



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Edificació  
de Barcelona

# **ENGINYERIA EN GEOMÀTICA I GEOINFORMACIÓ**

## **TREBALL DE FI DE GRAU**

### **ESTUDI DE L'EROSIÓ D'UN TALÚS AMB DADES TLS**

**Projectista:** David Hernández Marín

**Director:** Càrol Puig Polo

**Convocatòria:** Setembre/Octubre 2018-2019



**RESUM**

*Avui en dia els moviments de sòl com les esllavissades son un tema preocupant per a la seguretat de les persones i danys en les infraestructures. El monitoreig de zones per preveure i prevenir aquests fets son fonamentals per a evitar danys catastròfics.*

*Aquest projecte te com a objectiu trobar la metodologia idònia per a l'estudi de l'evolució d'un talús. Aquest estudi s'ha dut a terme amb campanyes de camp de maig de 2017 al abril de 2018. S'ha realitzat utilitzant dades làser i el seu posterior tractament. Durant aquest període de temps hem vist quina ha sigut l'evolució del talús comprovant distàncies entre punts homòlegs entre campanyes i canvis en els volums de terra. Amb aquestes dades es podrien prevenir futurs moviments de terres.*

**ABSTRACT**

*Today soil movements such as landslides are a worrying issue for the safety of people and damage to infrastructure. The monitoring of unstable areas to foresee and prevent these events is essential to avoid catastrophic damage.*

*This project aims to find the ideal methodology for the study of the evolution of a slope. This study has been carried out with field campaigns from May 2017 to April 2018. It has been done using laser data and its subsequent treatment. During this period of time we have seen what the evolution of the slope has been by checking distances between homologous points between campaigns and changes in land volumes. With these data, future earth movements could be prevented*



## Índex

1	Introduction.....	5
1.1	Objectives.....	6
2	Slope description .....	7
3	TLS (Terrestrial Laser Escaner).....	10
4	Data capture .....	12
5	Methodology .....	14
5.1	Preprocessing.....	14
5.1.1	Point cloud cleaning.....	14
5.1.2	Align .....	16
5.2	Processing.....	19
5.2.1	Distància (Algoritme M3C2 Distance) .....	20
5.2.2	Càlcul volum (2.5 Volum).....	22
6	Anàlisis de Resultats .....	23
6.1	Alineació .....	23
6.1.1	Alineació manual .....	23
6.1.2	ICP .....	24
6.1.3	Superfície .....	25
6.1.4	Comparació de resultats en l'alineació.....	27
6.2	Distàncies entre núvols.....	28
6.2.1	Resultats obtinguts a partir de l'alineament manual .....	28
6.3	Càlcul de volums entre núvols .....	29
	Conclusions .....	31
	Bibliografia.....	32
	ANNEXOS .....	34
	ANNEX I: Matrius de transformació i error MQ .....	36
	Matrius de transformació alineament manual.....	38
	Matrius transformació ICP .....	44
	Matrius transformació ICP superfícies .....	48
	ANNEX II: Càlcul distàncies .....	52
	ANNEX III: Càlcul Volum .....	60
	Càlcul de volum sense cuneta .....	68



## 1 Introduction

Today the loss of soil due to landslides represents a very important and dangerous erosion process in mountainous areas. The hillsides can become unstable due to the rains and generate serious repercussions for society. The movement of the soil due to torrential processes can have consequences such as damage to infrastructures or buildings, injured people or deathly victims. One of the last episodes that has had repercussions has been the one that occurred in July of this year (2018) in Castell de Mur where two people died due to an important landslide. Stones of great size covered and completely blocked the road where the vehicle in which the victims circulated was buried.

The prevention of risks in unstable areas is fundamental when avoiding possible accidents. The monitoring of these areas is essential to forecasting future landslides.

The idea of doing the study of the evolution of a slope with laser data emerges as part of an ongoing project called Slope Mass-wasting under climate change. Physical mechanisms, predictive modelling and possible mitigation strategies, known for its acronym "SMUCPHY" in which the loss of soil on hillsides under climate change is investigated: Physical processes, predictive modeling and possible mitigation strategies.

The SMUCPHY project works on three different scales: local, regional and global. Within the local scale is where the TFG is framed. In order to observe physical processes at the local scale, an artificial slope has been constructed with the objective of monitoring soil loss, analyzing the mechanisms of this loss through numerical models and the study of the effect of climate change on the mechanisms and describing mitigation strategies (Hürlimann *et al.*, 2017). This TFG will focus on the geomatic techniques used in slope monitoring.

To carry out the control of the slope, a laser scanner has been used, these devices analyze an object or scene to gather data of its shape or occasionally its color. The information obtained can be used to build three-dimensional digital models that can be used for a wide variety of applications. Although initially they have been developed for industrial uses today, the field of application has been extended in activities such as architecture, archeology, engineering or entertainment.

The purpose of a scanner is to create a point cloud from a surface. The model obtained by a laser describes the position in three-dimensional space of each point analyzed.

The laser used, by means of a laser beam, calculates the distance from the emitter to a point of an object within reach of its trajectory. To produce the 3D model, later these data are treated with software that allows to orient the obtained clouds.

## **1.1 Objectives**

The main objective of the TFG is the study of the evolution of an artificial slope with the passage of time. The study will be done in the 11 month time period, from May 2017 to April 2018.

In order to complete the main objective, the following secondary objectives will be realized:

- Find the optimal way to align between point clouds from different campaigns. To find the best way to do it, three different methods of alignment will be compared. A good alignment between clouds ensures a good result in the subsequent calculations.
- Detect at a small scale, landslides or soil movements between campaigns and their subsequent calculation of volume.



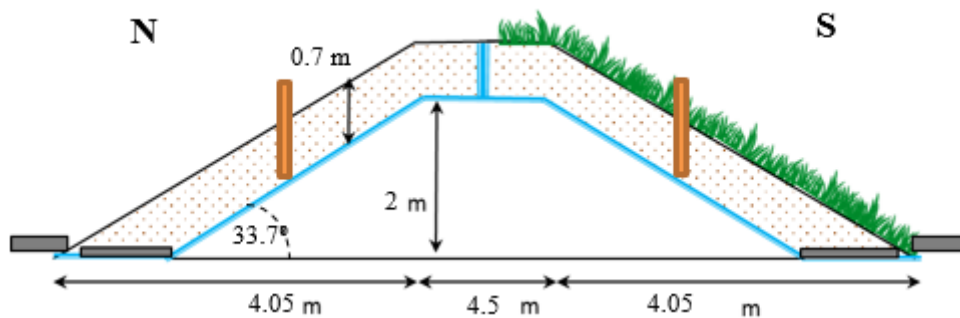
## 2 Slope description

The artificial slope of the SMUCPHY project is located in the UPC-Agropolis Park. Located in the municipality of Viladecans (Barcelona), on the road to the Philippines s / n. The agricultural park UPC-Agropolis is a scientific-technical unit, inaugurated on October 18, 2010, specializing in the fields of agri-food engineering, biotechnology engineering and environmental and landscape engineering, which serves research groups of the UPC, as well as companies and other external institutions.

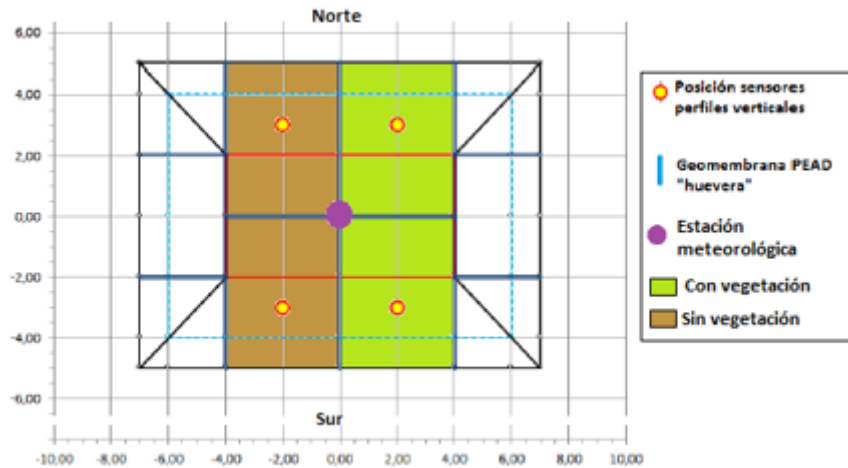
To carry out the SMUCPHY project, an artificial instrumented slope in the facilities was built between December 2016 and January 2017. This slope has dimensions of 18 m long, 12 m wide and 2.7 m high (Figura 3). It has a slope 3H: 2V and a thickness of 70 centimeters (Figura 2).



*Figura 1 Constructive process of the slope*



*Figura 2 Slope geometry*

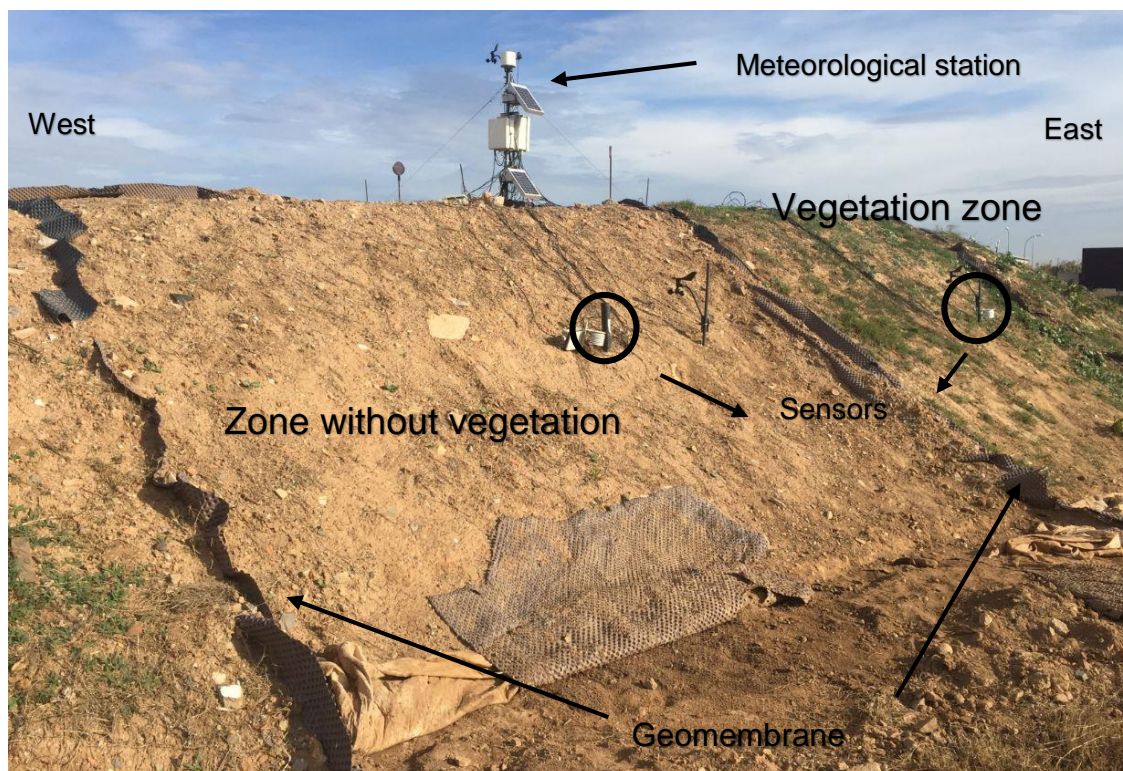


*Figura 3 Schematic diagram of the slope where we find vegetation zones and without vegetation zones and the position of the meteorological station and the sensors*

Being a project where different phenomena are studied, we find meteorological stations and sensors that will serve for other studies of slope evolution.

The slope is divided into two faces: north face and south face. Each of these faces is divided into two more zones, an area with vegetation and an area without vegetation. In the latter, products were poured to prevent vegetation growth.

Six cement blocks were placed, three on each side, to be able to hold threaded rods. The blocks were located at each end of each face of the slope and one in the center. At the time of scanning, the threaded rods are used to hold the targets. These targets are those that give back the points of alignment between scans. The use of concrete blocks ensures an immovable base even if there is soil movement.



*Figura 4 Slope zones*

### 3 TLS (Terrestrial Laser Escaner)

In this project, the instrument used is a long-range LiDAR Terrestrial and Time of Fly (TOF) technology model ILRI-3D (Optech). This instrument is mainly composed of a transmitter and a receiver of infrared LASER pulses (1535 nm), and of a scanner device composed of a system of rotating mirrors. According to the manufacturer, the maximum range of this instrument is 700 m, but depending on the reflectivity of the surface this distance may be less. The LASER pulse emitted can be reflected on several surfaces (vegetation, dust, rock, etc.) and therefore several reflected pulses can be recorded (Abellán et al., 2014; Petrie and Toth, 2008). The ILRI-3D instrument allows you to choose between the first or the last reflected LASER pulse. In the case of this study, the chosen value will always be the last pulse since in this way possible first pulses corresponding to obstacles such as vegetation are avoided (Abellán et al., 2014a, Petrie and Toth, 2008).

The resolution can be millimetric on nearby surfaces. This instrument acquires about 2,500 points per second. Precision is determined by the distance to the surface, by the reflectivity of the surface and by the angle of incidence (Ingensand, 2006).

According to the manufacturers in laboratory conditions, the precision can reach 7 mm at a distance of 100 m, but at natural surfaces and greater distances it reaches at centimetric level (Manetti i Steinman, 2007 i Royán M, 2015).

The basic system used in the data acquisition campaigns consists of the terrestrial LiDAR instrument fixed to the ground on a tripod and four batteries that provide power to the system (Figura 5). Optionally, a camera can be installed on the terrestrial LiDAR to obtain photographs with higher resolution than that provided by the camera installed inside the instrument itself, and a GPS antenna to obtain the position of the scanning station and for a possible subsequent georeferencing of the the data. It should be noted that this georeferencing with respect to a standard system is not necessary, since it is possible to work in the own coordinate system of the terrestrial LiDAR instrument, as has been the case of this work.





*Figura 5 Batteries and LIDAR*

Three circular targets of the Leica house have also been used. The targets are artificial objects constituted with a highly reflective material. Its reflectivity value is much larger than its surroundings, therefore, it can be quickly detected with specialized software. These targets are placed on threaded rods which were held by the concrete blocks. (Figura 6).



*Figura 6 Scan from the South side*

The program used is the CloudCompare. It is a software for processing 3D point clouds and triangular mesh. It was originally designed to make a comparison between two dense clouds of 3D points (such as those acquired from a Laser Scanner) or between a cloud of points and a triangular mesh. Later, it was extended to a more generic point cloud processing software, which includes many advanced algorithms (registration, resampling, normal, scalar, statistical calculations, sensor management, automatic or interactive segmentation, visualization improvement, etc.)

## 4 Data capture

Before taking the data with laser scanner, a topographic survey was made with which we calculated the approximate volume of the slope. It has been made from the comparison between two surfaces, that is, between a surface of the base of the slope and the entire surface of the slope.

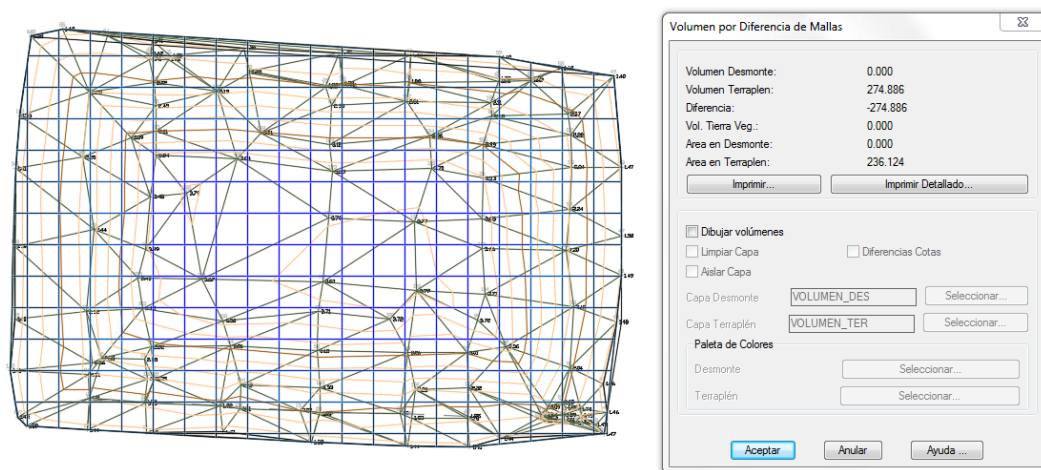


Figura 7 Calculation of the surface of the slope with the software AutoCAD

As a first step for a correct data collection we have to prepare and be aware of what is the final result we want to obtain. An important aspect when it comes to taking data is the method we will use when doing the scans.

To scan an element in time can be done in ways, a first stationing the instrument always in the same place and thus avoid shadows or certain areas are hidden. A second way is to introduce fixed elements in time, such as targets, which will help us to align clouds from different campaigns.

The method used in scanning the slope over time has been the use of targets. These targets must always be visible in the scope of the scan. In this way the center of the target will be a fixed point when it comes to making the alignment between scans of different campaigns

In the first campaign the entire slope was scanned making a total of six scans. In subsequent campaigns, the study area was centered on both sides of the slope, therefore it was stationed on each side of the slope (north side, south side) from a position where data can be obtained from the entire side and the targets.

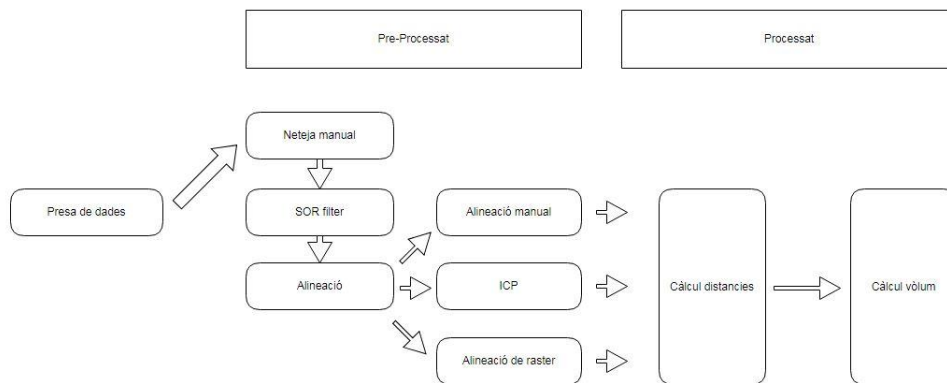
Another aspect to take into account is the density of data points obtained. This point density is inversely proportional to the spacing between points that is decided when acquiring the data by selecting the angular spacing between laser pulses. It must be defined taking into account the distance to the scanning surface. This density will determine the spatial resolution of the changes that will be detected in the wall of the slope.

In this project, 4 field campaigns have been made to capture data:

- Campaign T0: May 2, 2017. Resolution: 4 mm
- Campaign T1: May 25, 2017. Resolution: 3,5mm
- Campaign T2: November 24, 2017. Resolution: 1,3 mm
- Campaign T3: April 10, 2018. Resolution 1,2 mm

In this way the evolution of the slope will be obtained in the course of almost an entire year.

## 5 Methodology



*Figura 8 Work methodology*

### 5.1 Preprocessing

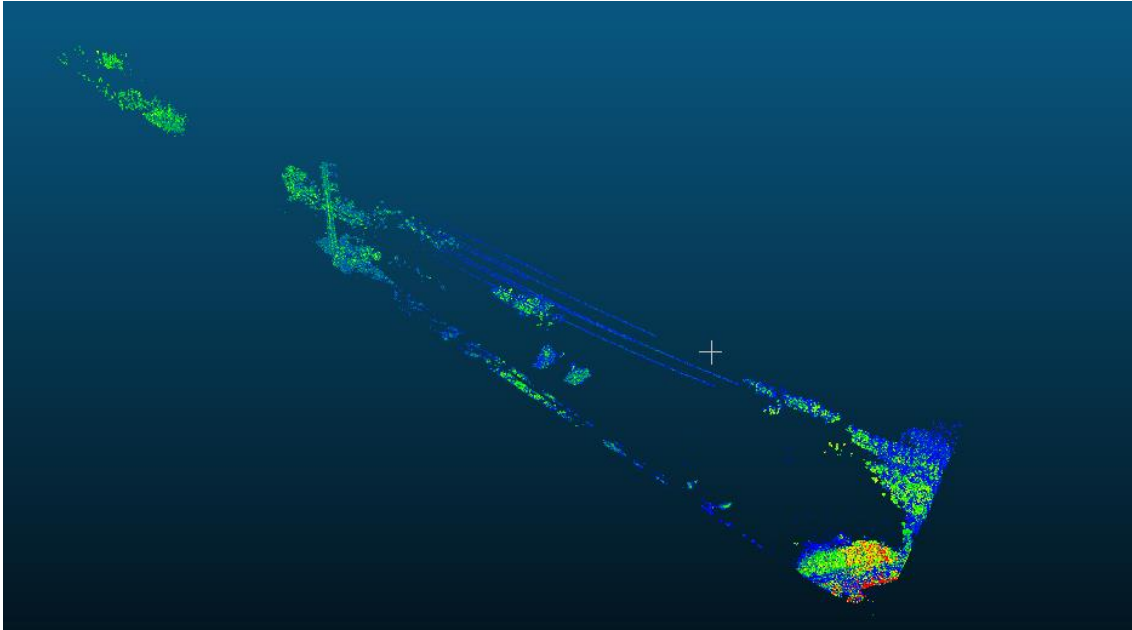
Once the data have been acquired, it will be necessary to clean the zone of the study area. In this way, everything outside the study area will be eliminated, as well as vegetation or noise.

#### 5.1.1 Point cloud cleaning

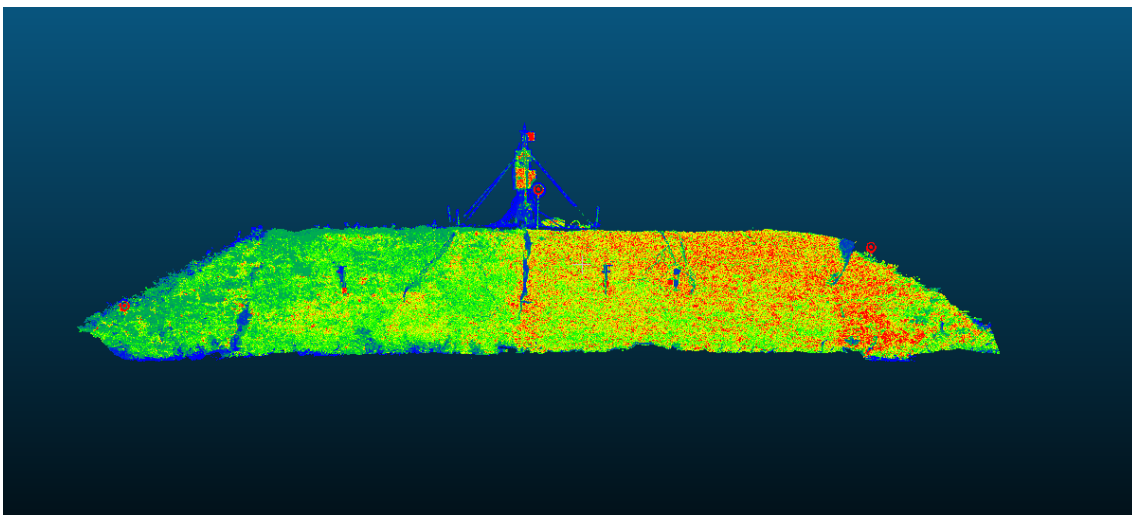
##### 5.1.1.1 Manual cleaning

Clearing point clouds consists of two steps. First, all the points that at a glance are outside the scope of the study will be eliminated manually. (Figura 9). The program allows to make a selection of points that can be cut out and removed from the scope (Figura 10).





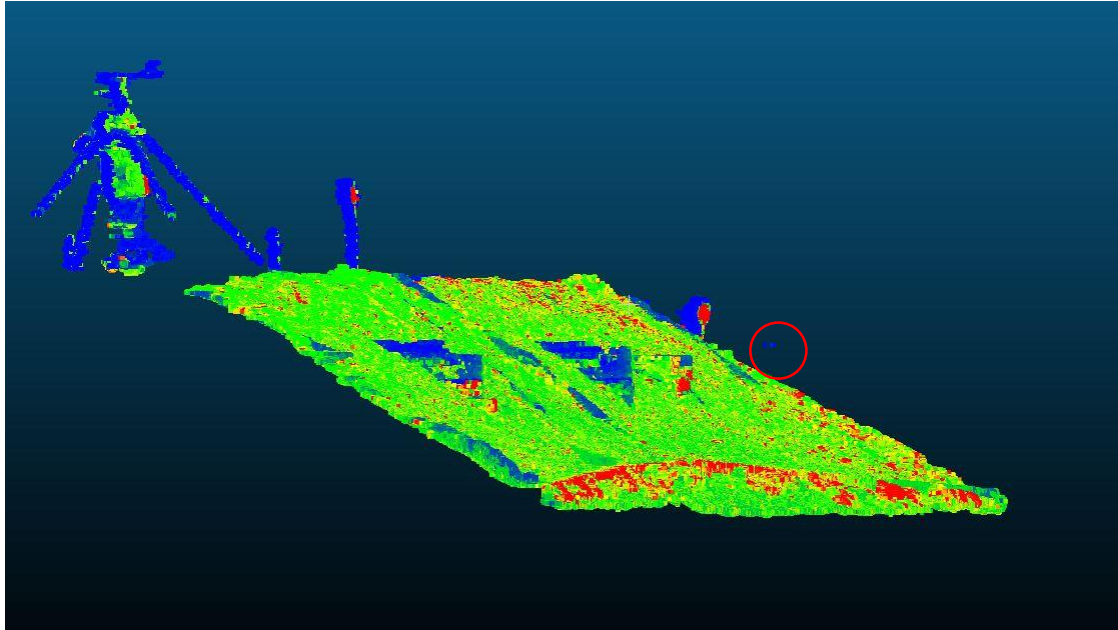
*Figura 9 Cloud before cleaning*



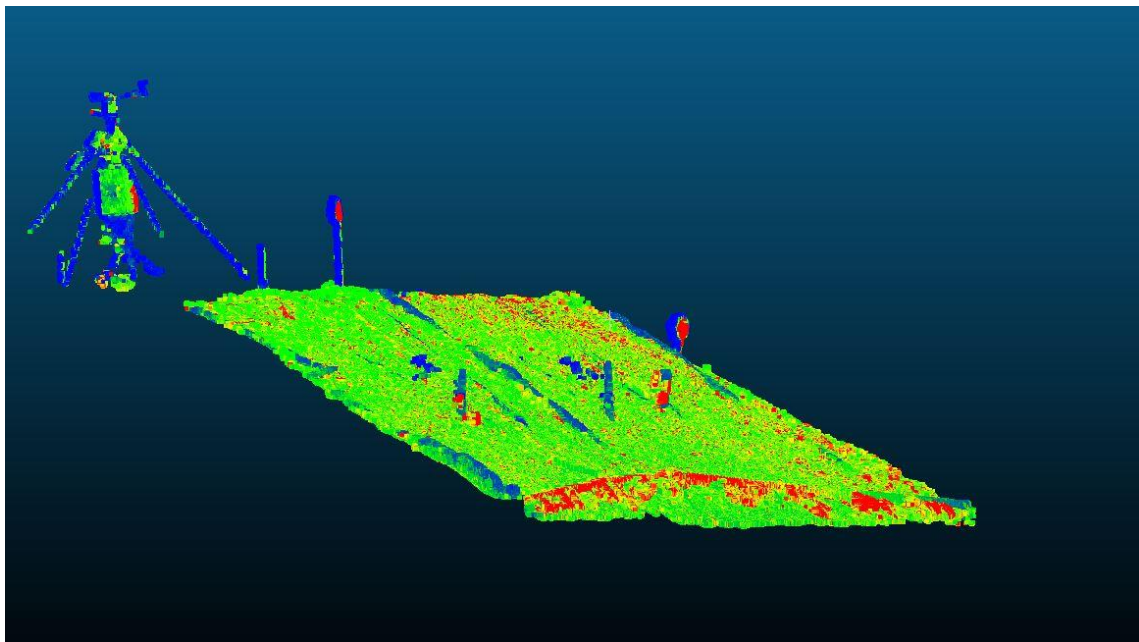
*Figura 10 Point cloud manually cleaned*

#### **5.1.1.2 SOR filter**

Next, a filter called Statistical outlier Removal (SOR) filter will be used to eliminate the noisy points that can pervert the results. This tool calculates the average distance of a point to its neighboring points (you must indicate which is the number of neighboring points that you want it to calculate). Then, it will eliminate all points beyond the average distance plus a number of times the standard deviation (Figura 11 i Figura 12).



*Figura 11 Pre-cleaning cloud with SOR filter tool (marked area that needs to be removed)*



*Figura 12 Cloud result. The marked area has been removed.*

### 5.1.2 Align

One of the most important steps in the calculation of differences is the alignment of the clouds from the scanning. Next, we will align the point clouds of both the South zone and the North zone of each of the field campaigns.

In order to see the result clearer, once the faces are aligned, each of the North and South areas will be divided into the two areas mentioned above, the vegetation zone and the

non-vegetation zone. Therefore, the vegetation zone should be treated again by eliminating areas with vegetation to be able to see the bare soil.

To carry out the alignment, three different methods will be compared. The most appropriate method will be used for subsequent distance and volume calculations.

A first method is manual alignment with homologous points in both clouds. These homologous points will be the centers of the targets placed on the slope. Some differential point of the meteorological station located on the slope will also be used. It is very important therefore that these points do not suffer movements with the passage of time

The second method will be an iterative process in which a first alignment is combined by homologous points in both clouds (the first method) and a second automatic alignment consisting of the alignment by means of points homologous with the Iterative Closest Points (ICP) algorithm. In this method we will first have to determine the number of random points used for the alignment.

As a third method the clouds will be aligned, even though they will be previously rasterized. This rasterization consists of creating a new surface where areas without data are interpolated from the nearest points. In this method we will directly align the point cloud, without using help from the targets. In this way, one surface will be directly aligned on the other.

#### **5.1.2.1 Manual align with selection of pairs of homologous points**

A simple but powerful tool, the Align to the CloudCompare, will be used for this process. It consists of aligning by selecting pairs of points. First, choose which cloud will be the reference and which will be the aligned (Figura 13). Allows the user to choose several pairs of equivalent points in each cloud to register them (Figura 14). While the process is manual, it can be relatively quick and precise.

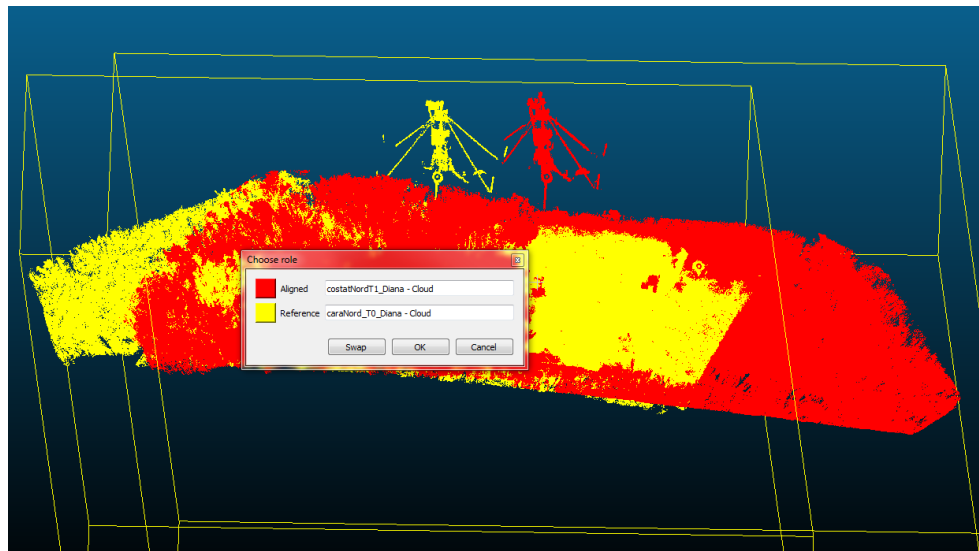


Figura 13 Pre-alignment between T0-T1 campaigns with homologous points

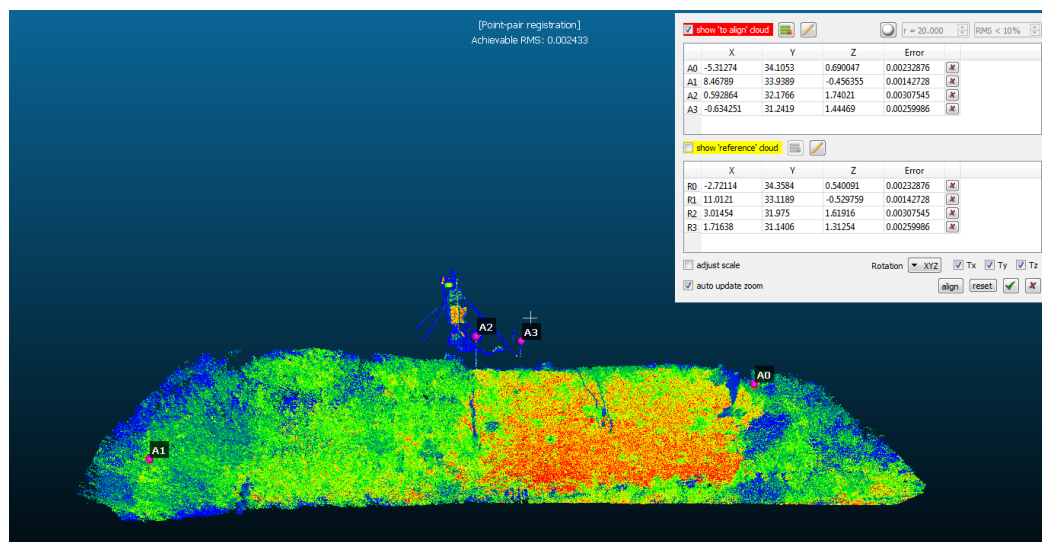


Figura 14 Alignment between T0-T1 already made with 4 homologous points

### 5.1.2.2 ICP (Iterative Closest Points)

This algorithm developed by Chen and Medioni (1991) allows automatically aligning point clouds by decreasing their distance. Being iterative, during the process the registration error decreases. You can specify the program to stop at a maximum number of iterations or when the RMS error between two iterations is less than a certain threshold. Although it is not the case of the study, you can get to superimpose portions of corresponding clouds of 10 percent or less. In this case, an overlap of around 60 percent will be used. If you indicate 100 percent overlap, the program tries to align all the points and move one cloud over the other.

A maximum number of subsampled random points will also be indicated, thus drastically increasing the calculation speed. Depending on the study area or its size this can give errors in the calculations. The software will use the number of subsampled points randomly to do the alignment.

As a last step you can activate the elimination of distant points between two clouds, such as noise. This causes the program, after each iteration, delete the data that is too far away from the model point.

### **5.1.2.3 Alignment from a rasterization**

This third method will consist of aligning previously rasterized clouds.

To begin with the procedure, we will start rasterizing the clouds to work, in this way we will get a 2.5D mesh which, if necessary, can be exported as an image. Firstly, the mesh step must be decided, in this case, as it is a small work area, we will use a low mesh step. Also the direction of the projection (Y in this case). To deal with the empty zones, there are two options, the first one is to leave the empty area without data, the second interpolate and in this way "fill" the zone. It consists of a linear interpolation with the nearest non-empty neighbor cells. This will give good results in case of small holes. Care should be taken in case the interpolator hole is too large, as it could give errors or false data.

Once defined, the program gives a result which can be exported in different formats such as a point cloud, a GeoTIFF or a mesh.

Then it will conclude with the alignment between the two meshes or clouds using the ICP method. This method will be used since in this cloud / mesh the targets will not be found. This is so because when interpolating, they would also use the data from the targets and the result would not be correct.

## **5.2 Processing**

Once the clouds are aligned and cleaned, the processing of the data continues. As you want to discover changes in this slope you should compare distances between campaigns. To do this, the distances between homologous points of the slope will be compared, in this way a result cloud will be created where the difference of the distances (Y axis) between these two clouds will be seen very visually.

### 5.2.1 Distància (Algoritme M3C2 Distance)

Per al càlcul de distàncies entre núvols de punts es treballarà amb l'eina de CloudCompare "M3C2 distance". Abans de mostrar dades, primer es descriurà com opera el M3C2 per mesurar la distància entre dos núvols de punts, com s'estimen els intervals de confiança i com es comparen els seus càlculs amb tècniques existents utilitzant núvols de punts. Suposant que els dos núvols corresponen a campanyes successives, la primera es denominarà núvol de referència i la segona núvol comparat.

#### Algoritme M3C2

Tot i que els càlculs es poden realitzar només en punts particulars, anomenats punts centrals per accelerar els càlculs en núvols densos, en el cas d'aquest estudi es farà en una versió sub-mostrejada del núvol . Fem servir un conjunt de punts centrals de càlcul per als quals es calcula una distància i un interval de confiança.

Els punts centrals generalment seran una versió sub-mostrejada del núvol de referència (establint un espaiat de 0,01 m entre punts). Tot i tenir en compte el fet que els resultats del càlcul generalment es necessiten, en zones d'estudi molt amplies, a una resolució espacial més baixa, més uniforme (per exemple, 10 cm) que l'espaiat de punt irregular en brut de escanejos d'alta densitat (per exemple, 1 cm o menys ) en aquest treball s'ha realitzat amb espaiat de 0,01 m .

#### Càlcul de les normals de la superfície en 3D

Per a qualsevol punt central donat  $i$ , es defineix un vector normal per a cada núvol ajustant un pla als veïns ( $NN_i$ ) d'aquest núvol que estan dins d'un radi  $D / 2$  de  $i$  (Figura 15a). Cada normal s'orienta positivament cap al més proper d'un conjunt de punts d' "orientació" definits per l'usuari (per exemple, les diverses posicions d'escaneig). La desviació estàndard de la distància dels veïns  $NN_i$  al pla de millor ajust es registra i s'utilitza com una mesura de la rugositat del núvol  $\sigma_i(D)$  a escala  $D$  en el veïnatge de  $i$ .

L'algoritme ofereix l'opció de calcular superfícies normals en una versió sub-mostrejada dels núvols per accelerar el càlcul conservant una bona precisió.

L'algoritme ofereix la possibilitat d'utilitzar l'estimació normal en el núvol de referència, en el núvol comparat o la mitjana de les dues direccions normals. Quan els dos núvols són localment coplanaris, no canvia la distància mesurada. Quan es produeix un canvi en l'orientació de la superfície, la distància mesurada dependrà de la referència normal triada (Figura 15b). Utilitzant la mitjana de les dues mesures mitiga aquest efecte i fa

que el mesurament sigui reversible. L'elecció de la normal la imposa l'usuari en funció de la seva aplicació. En geomorfologia i en absència de la correspondència entre els dos núvols, la distància generalment es calcularà utilitzant l'estimació normal en el núvol del punt de referència. Això es justifica pel fet que els processos geomorfològics tendeixen a dependre de la geometria de la superfície (per exemple, pendent topogràfica per a processos fluvials, erosió de vessants, estabilitat de la roca). Per tant, a causa de la causalitat, és més probable que el canvi mesurat resulti de la geometria inicial, en lloc de la final.

### **Càlcul de distància entre dos núvols de punts**

Una vegada que es defineix la normal per al punt central  $i$ , s'usa per projectar  $i$  en cada núvol a escala  $D$  (anomenada escala de projecció). Això equival a definir les posicions mitjana  $i1$  i  $i2$  de cada núvol en el veïnatge d' $i$  (Figura 15b). Això es fa definint un cilindre de radi  $D/2$  l'eix del qual passa per  $i$  que està orientat al llarg del vector normal (Figura 15b). S'imposa una longitud màxima del cilindre per accelerar el càlcul. La intersecció de cada núvol amb el cilindre defineix dos subconjunts de punts de mida  $n1$  i  $n2$ . Projectar cadascun dels subconjunts en l'eix del cilindre proporciona dues distribucions de distàncies (amb un origen en  $i$ ). La mitjana de la distribució dona la posició mitjana del núvol al llarg de la direcció normal,  $i1$  i  $i2$ , i les dues desviacions estàndard donen una estimació local de la rugositat del núvol de punts  $\sigma_1(d)$  i  $\sigma_2(d)$  al llarg de la direcció normal. Si s'esperen valors atípics en les dades (com la vegetació),  $i1$  i  $i2$  es poden definir com la mitjana de la distribució de la distància i la rugositat es mesura pel rang interquartílic. La distància local entre els dos núvols  $L_{M3C2}(i)$  ve donada per la distància entre  $i1$  i  $i2$  (Figura 15b).

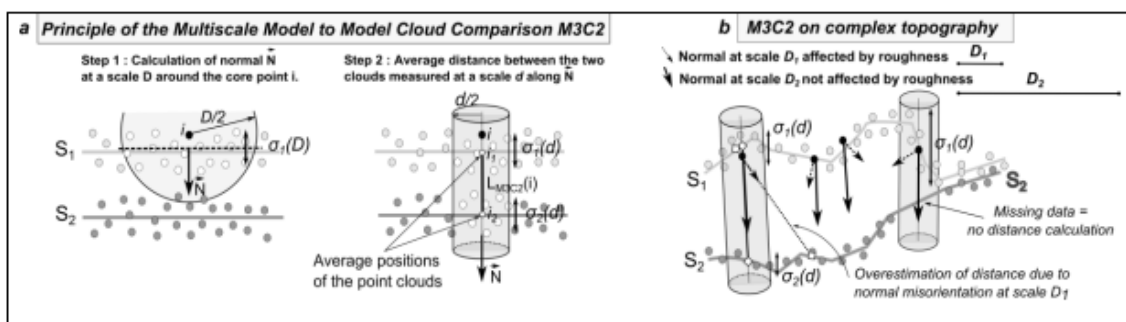


Figura 15 Descripció del algorisme M3C2 Distance (Lague, Brodu and Leroux, 2013)

### 5.2.2 Càlcul volum (2.5 Volum)

Per a calcular el volum resultant entre dos núvols s'utilitzarà també el programari CloudCompare. L'eina "Volume 2.5D" permet fer el càlcul de volum entre dos núvols 2.5D.

Per començar s'haurà de triar que es farà amb els forats del núvol buits ja que al no tenir dades no poden ser utilitzats a la hora de fer càlcul de volum entre núvols. En aquest cas es podrien utilitzar dues opcions. La primera, deixar buit el forat, sense dades, d'aquesta manera no hi hauria resultat en aquest espai. La segona, interpolar, ens interpolerà entre les dades que envolten el forat.

En aquest cas, la millor opció es la interpolació, d'aquesta manera el volum total serà molt més proper al volum real entre núvols. S'ha de tenir en compte que al interpolar utilitzarà tots els punts del núvol, per tant, aquest núvol haurà estat prèviament ben netejat per no tenir dades errònies.

Com a segon pas es triarà la malla, el qual serà de 1mm. Quan mes petita sigui la malla, mes acurat serà el resultat del volum entre dos núvols.

Per a calcular el volum, CloudCompare suma la contribució de cada cel·la. Aquesta contribució es el volum del paral·lelepípede elemental corresponent a la petjada de la cel·la multiplicat per la diferencia d'alçada. Només es calcula aquest volum en el cas que tinguin un valor d'alçada el núvol terra i el núvol "cel", per tant es recomanable minimitzar el nombre de cel·les buides.

Quan es completa la generació d'aquesta xarxa es mostra un informe a la part inferior. Aquest mostra el volum total i la superfície base.



## 6 Anàlisis de Resultats

### 6.1 Alineació

A conseqüència d'utilitzar tres mètodes diferents per als càlculs, s'obtingran diferents resultats, els quals, es valorarà quin és el que s'aproxima més a la realitat. Aquestes diferències vindran donades pels diferents mètodes d'alineació.

#### 6.1.1 Alineació manual

A l'hora d'alinejar manualment es defineix quins seran els punts a alinear, això dona la confiança de que el programa no alinearà punts que no son homòlegs. Per a fer aquest procés, s'utilitzarà el núvol sencer, es a dir, ja sigui el costat nord o costat sud, inclouran la part de vegetació i la part sense vegetació. Un cop alineats es procedirà a tallar les dues zones: zona amb vegetació i zona sense vegetació.

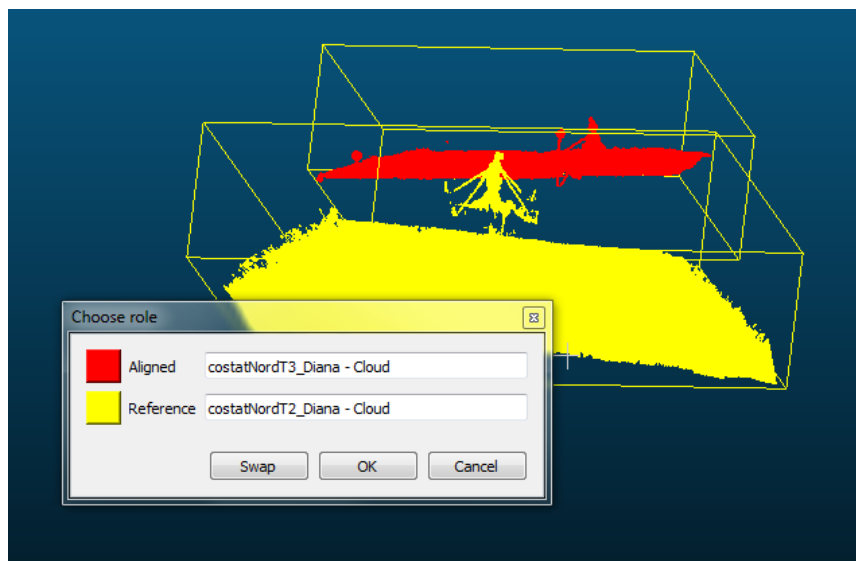


Figura 16 Alineament manual del costat Nord de campanyes T0 i T1 (referencia: T0).

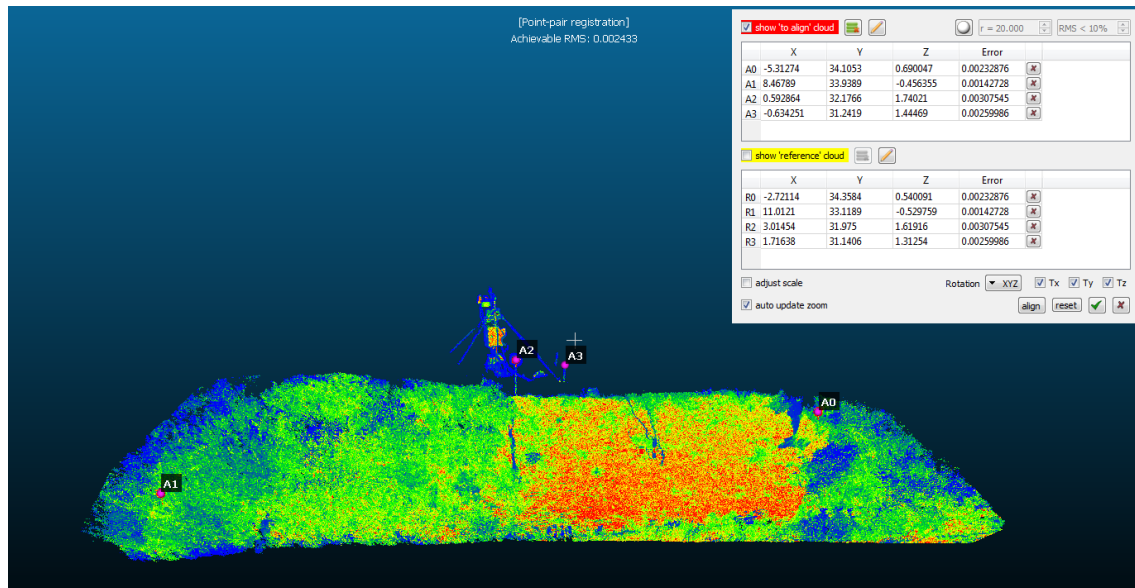


Figura 17 Selecció de 4 punts per l'alineació.

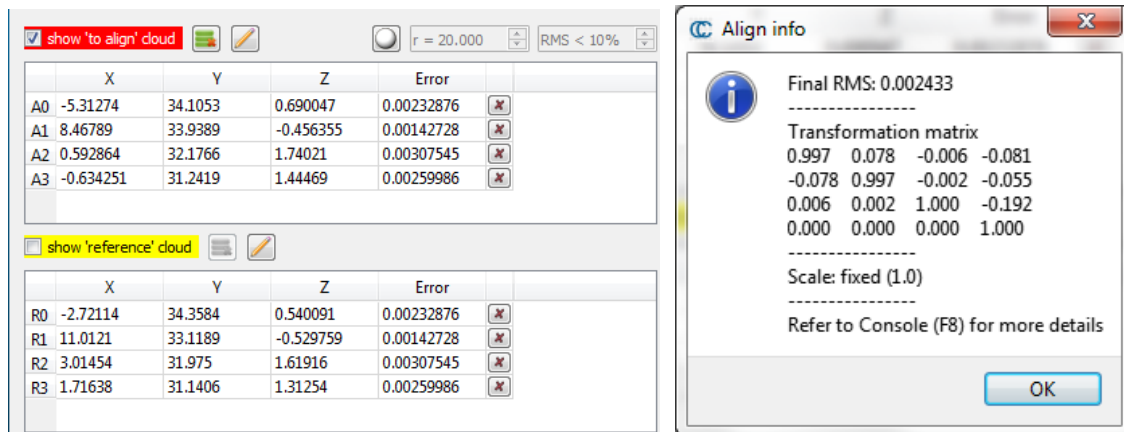


Figura 18 Errors de l'alineació i matriu de transformació

### 6.1.2 ICP

En aquest mètode s'alineen els núvols a partir d'un gran número de punts aleatoris. També es defineix la superfície, en percentatge, que es vol superposar. Tot i només utilitzar aquest mètode en la zona sense vegetació, es poden trobar zones on encara n'hi hagi crescut una mica. Per tant, no interessa definir-li una superposició molt elevada, ja que resultaria un resultat erroni, a causa de voler alinear punts on abans s'hi trobava vegetació i en l'actualitat no, o viceversa. A continuació, un cop s'obté la matriu de transformació, aquesta es podria utilitzar per a rotar la zona amb vegetació. D'aquesta manera es podria comprovar si aquest mètode ens serveix a la hora de calcular la diferència de volum en aquesta zona amb vegetació.

Per a fer l'alineació, prèviament s'eliminaran les dianes per a que el programa no doni un resultat erroni.

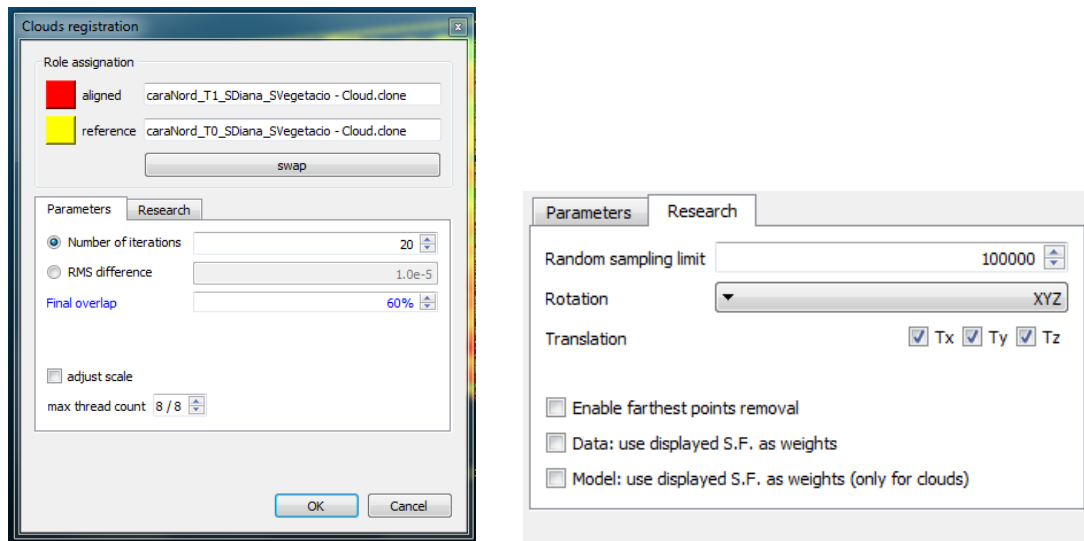


Figura 19 Alineació ICP (60 per cent de superposició)

### 6.1.3 Superfície

El fet de crear una superfície previ a l'alineació fa que es tingui una densitat més elevada del núvol. Es treballarà amb un pas de malla de 1mm, tot i ser un pas de malla massa petit, al ser un núvol no massa gran podem treballar bé. A continuació s'alinejarà a partir del algoritme ICP indicant-li un 60 per cent de superposició (igual que anteriorment). Una densitat de punts més elevada, a causa de la interpolació, ens aportarà un volum d'informació més alt en el càlcul de distàncies entre núvols.

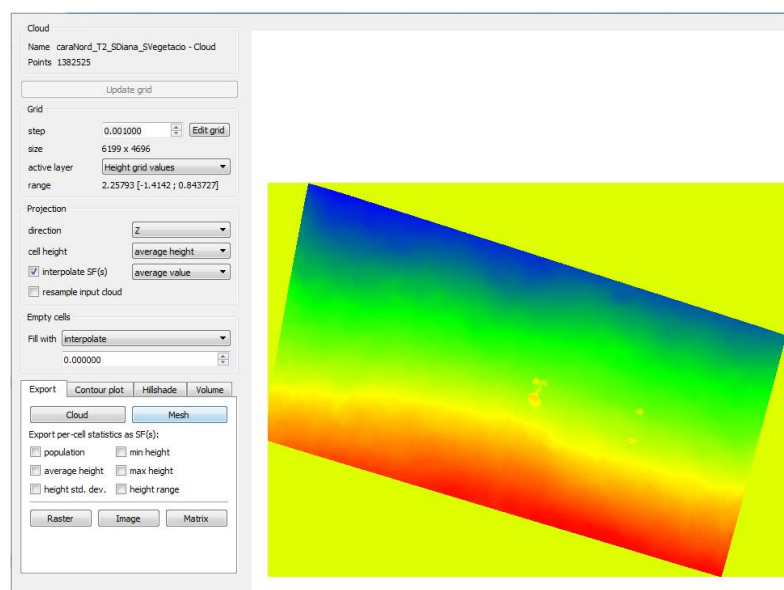


Figura 20 Creació de la superfície.

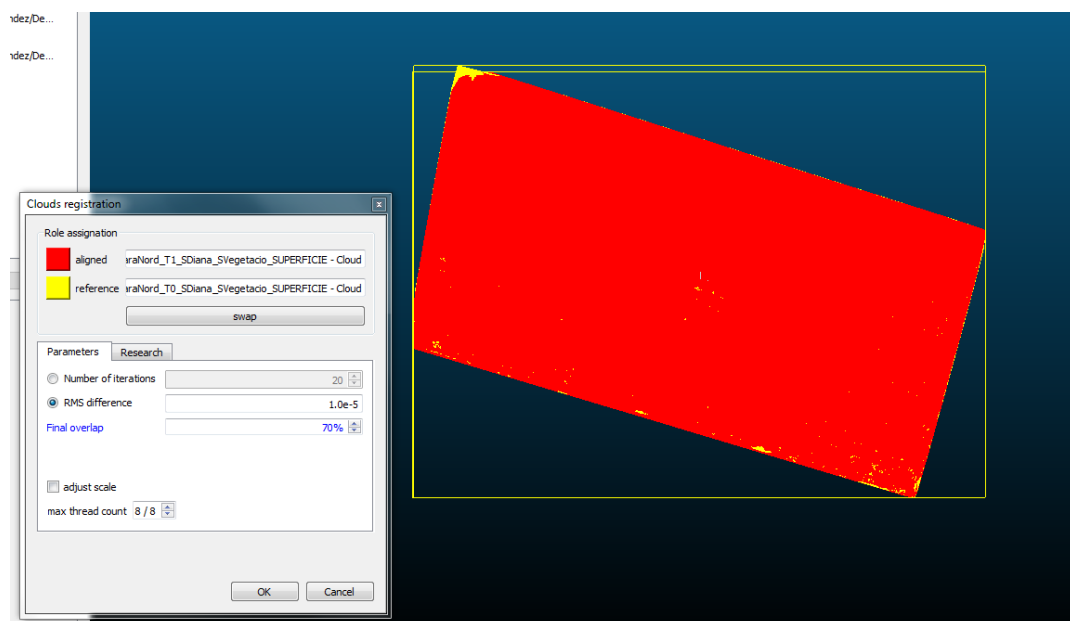
En aquest gràfic es veu el número de punts de cada un dels núvols després de crear un pas de malla de 1mm. Els punts creats, han sigut a partir de la interpolació dels punts del seu voltant.

<b>Costat Nord (Sense vegetació)</b>	<b>Nº de punts previ</b>	<b>Nº punts superfície</b>
<i>T0</i>	267845	17837274
<i>T1</i>	1411546	17827873
<i>T2</i>	1377177	17867198
<i>T3</i>	1649887	17801618

*Taula 1 Nº de punts previs i posteriors a la realització de la interpolació al costat Nord*

<b>Costat Sud (Sense Vegetació)</b>	<b>Nº de punts núvol</b>	<b>Nº punts superfície</b>
<i>T0</i>	345254	17078846
<i>T1</i>	554233	17202325
<i>T2</i>	1201403	17016308
<i>T3</i>	1167396	17017681

*Taula 2 Nº de punts previs i posteriors a la realització de la interpolació al costat Sud*



*Figura 21 Alineació ICP de la superfície (T0-T1 Costat Nord)*

### 6.1.4 Comparació de resultats en l'alineació

Un cop s'han fet les 3 alineacions, es compararà quin es el error mig quadràtic (en m) de cada una d'aquestes alineacions i valorarem els resultats.

<b>Costat Nord</b>	<b>Alineació Manual (m)</b>	<b>Alineació ICP (m)</b>	<b>Alineació per Superfície (m)</b>
<i>T0-T1</i>	0.0024	0.0118	0.0126
<i>T1-T2</i>	0.0047	0.0094	0.0118
<i>T2-T3</i>	0.0044	0.0082	0.0102

*Taula 3 Error mig quadràtic en cada un dels mètodes d'alineació en el costat Nord*

<b>Costat Sud</b>	<b>Alineació Manual (m)</b>	<b>Alineació ICP (m)</b>	<b>Alineació per Superfície (m)</b>
<i>T0-T1</i>	0.0060	0.0075	0.0096
<i>T1-T2</i>	0.0041	0.0084	0.0106
<i>T2-T3</i>	0.0054	0.0087	0.0107

*Taula 4 Error mig quadràtic en cada un dels mètodes d'alineació en el costat Sud*

Com es veu al gràfic clarament, l'alineació manual dona un error inferior a la resta d'alineacions. Això pot ser donat per diferents raons. La primera, es que a l'hora d'alinejar es decideixen manualment quins son els punts homòlegs, d'aquesta manera se sap de forma segura que aquests punts no han patit cap moviment. La segona raó es que tant si s'alineja amb l'algoritme ICP o amb aquest mateix algoritme amb un núvol molt dens el programari utilitzarà punts aleatoris els quals no tenen perquè ser homòlegs. En cas de que hi hagi hagut un moviment de terra el programa podria utilitzar aquests mateixos punts a l'hora d'alinejar. Per tant, es pot comprovar que la manera mes adient per a alinejar un sòl irregular serà l'alineació manual.

## 6.2 Distàncies entre núvols

Un cop alineats els núvols, es procedeix al càlcul de distàncies entre punts dels dos núvols. D'aquesta manera es veurà quina ha sigut l'evolució del talús i es podrà comprovar, a simple vista, en quines zones ha perdut o guanyat volum de terra.

Previ al càlcul de distàncies, s'ha de comprovar que el terreny es completament nu, es a dir, no trobar-hi cap tipus de material que pugui pervertir el resultat. En aquest cas, s'hi troben antenes i petits molins que van ser instal·lats entre les campanyes T1 i T2 els quals han de ser eliminat abans de fer el càlcul.

### 6.2.1 Resultats obtinguts a partir de l'alineament manual

Per a fer el càlcul de distàncies utilitzarem els núvols de punts que han sigut alineats manualment prèviament. S'utilitzarà l'algoritme M3C2 Distance del software CloudCompare explicat a l'inici. Li indicarem al programari que volem un submostrejat de 1 cm pel càlcul de distàncies entre núvols.

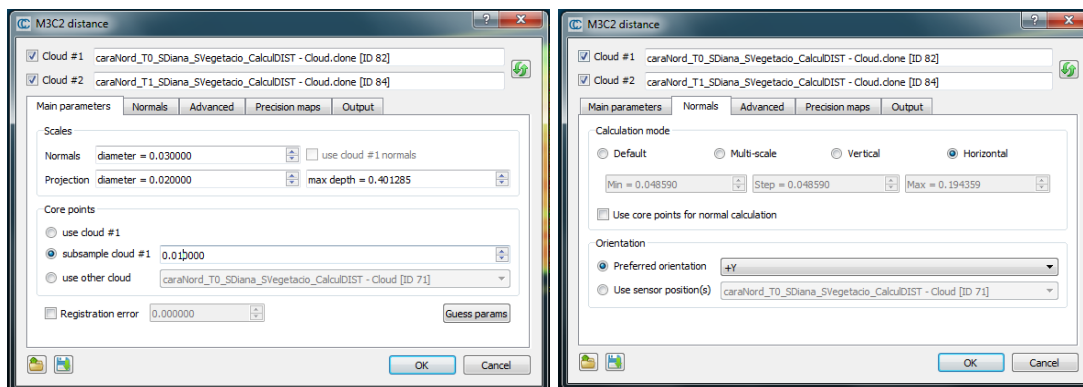


Figura 22 Paràmetres utilitzats a l'hora de calcular la distància entre núvols.

El resultat ens dona un núvol en el que es pot veure les diferències en distància entre punts homòlegs dels dos núvols (Figura 23).

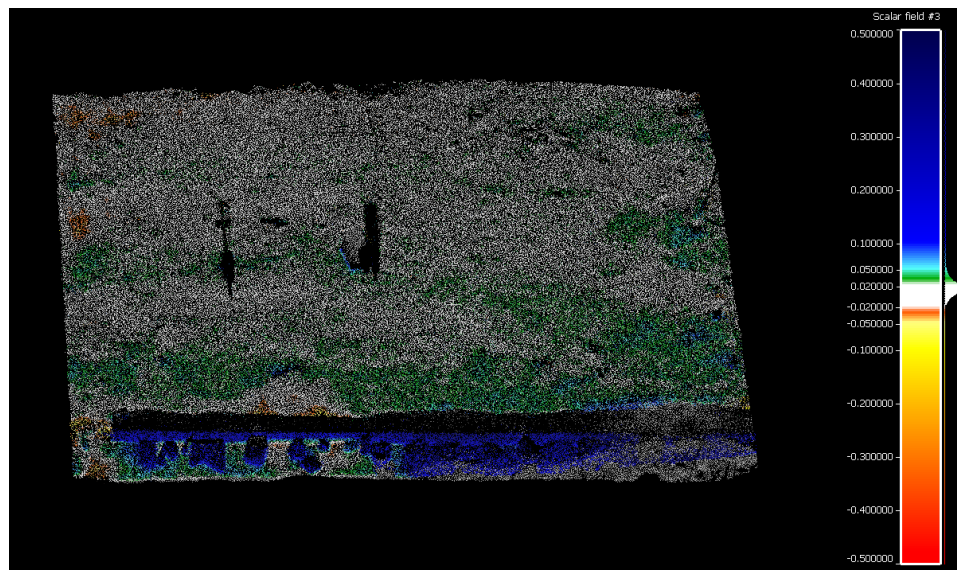


Figura 23 M3C2 Distance. Distàncies entre els núvols T2-T3 del costat Nord

A simple vista es pot reconèixer zones on hi ha hagut terraplè o desmunt. En la figura anterior es veuen zones on la distància entre els núvols T2-T3 es molt elevada (mes de 20 cm). Això es a causa de la construcció d'una canaleta a la zona baixa del talús.

### 6.3 Càlcul de volums entre núvols

Com a últim pas, s'utilitzaran els mateixos núvols que prèviament s'han utilitzat pel càlcul de distàncies entre núvols per a calcular el volum entre dos núvols consecutius. D'aquesta manera s'obtindrà un valor absolut per comparar els diferents canvis de volums durant les campanyes.

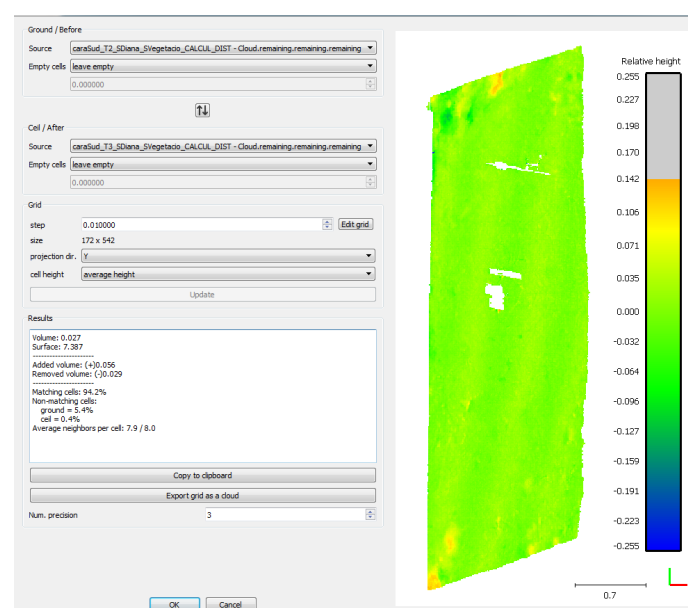


Figura 24 Càlcul de volum entre T2-T3 Costat Nord

A més a més de poder veure quin volum hi ha entre els dos núvols, també es pot observar si aquest terreny ha sigut afegit o extret, el seu volum total i la correspondència, en percentatge, entre punts dels dos núvols (Figura 24).

Costat Nord				
Campanyes	Volum (m <sup>3</sup> )	Afegit (m <sup>3</sup> )	Extret (m <sup>3</sup> )	Matching Cells (%)
T0-T1	0.094	0.104	0.01	93.7
T1-T2	-0.296	0.05	0.301	97
T2-T3	0.146	0.155	0.010	92.5

*Taula 5 Volums entre Campanyes del costat Nord*

Costat Sud				
Campanyes	Volum (m <sup>3</sup> )	Afegit (m <sup>3</sup> )	Extret (m <sup>3</sup> )	Matching Cells (%)
T0-T1	-0.230	0.07	0.237	96.1
T1-T2	0.162	0.177	0.015	97.7
T2-T3	0.027	0.056	0.029	94.2

*Taula 6 Volums entre campanyes costat Sud*

Si s'observen les taules (Taula 5 i Taula 6) es pot comprovar el canvi que ha patit el talús en el pas d'aquests 11 mesos.



## Conclusions

Aquest projecte intenta buscar la manera òptima per l'estudi de l'erosió d'un talús amb el pas del temps, d'aquesta manera s'ha buscat una metodologia adient basant-nos en els resultats obtingut.

Un dels problemes sorgits ha estat el factor humà, ja que entre els períodes d'escanejos s'han fet diferents modificacions en el talús. Entre la campanya 1 i la campanya 2 van instal·lar-s'hi sensors i entre les campanyes 2 i 3 es va construir un canaló. Aquest fets fan que els resultats obtinguts no siguin exclusivament de l'erosió natural del talús. Tots aquests objectes han hagut de ser eliminats manualment (sensors i estacions meteorològiques) ja que no formen part de la geometria del talús.

Per un altre costat, en les zones on trobem vegetació ha sigut del tot impossible obtenir dades del sòl. El fet de que la vegetació fos tant densa ha fet que el làser no aconseguís obtenir dades de la superfície del sòl en aquestes zones. S'ha utilitzat el plugin CANUPO (Caracterización de Nubes de Puntos) del software CloudCompare per a l'eliminació de la vegetació però no ha sigut possible l'eliminació d'aquesta.

La superfície de l'estudi es bastant petita, tenint en compte que la meitat del talús es cobert per vegetació, ens queda un àmbit força petit. De totes formes, aquesta mateixa metodologia seria igualment útil per a zones amb una superfície molt més gran.

Un altre fet important es l'alineació utilitzada entre núvols. La diferencia de distàncies en el temps entre els núvols pot ser diferent depenent del mètode d'alineació emprat. Després d'avaluar els diferents mètodes s'ha escollit el mètode d'alineació manual. En aquest cas, tenint 3 dianes on repenjar-se a mes a mes de l'estació meteorològica, sense cap altre objecte extern inamovible, l'ús d'una alineació manual es l'únic que ens dona garanties d'un bon resultat. Tot i això, el RMS obtingut podria haver sigut menor si s'haguessin utilitzat més dianes a l'hora d'alinejar. El fet d'utilitzar més dianes asseguraria una bona alineació en cas de que algunes de les dianes patissin moviment. Això ens asseguraria una alineació més acurada.

Observant la morfologia dels núvols de punts del talús obtingudes en les primeres campanyes es va optar per millorar la resolució d'escaneig a les campanyes posteriors. El fet d'utilitzar una resolució més baixa en les primeres campanyes fa més difícil l'alineació entre punts homòlegs entre núvols en les primeres campanyes.

## Bibliografia

Hürlimann, M. *et al.* (2017) 'Pérdida de suelo en laderas bajo cambio climático. Procesos físicos, modelación predictiva y posibles estrategias de mitigación - El proyecto de investigación "SMUCPHY"', *X Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables Santander*, pp. 1200–1211. Available at: <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/106105>.

Lague, D., Brodu, N. and Leroux, J. (2013) 'Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z)', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82(February 2013), pp. 10–26. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.

Royán M (2015) 'Caracterización y predicción de desprendimientos de rocas mediante LiDAR Terrestre. Rockfall characterization and prediction by means of Terrestrial LiDAR', *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*, p. 246.



## **ANNEXOS**



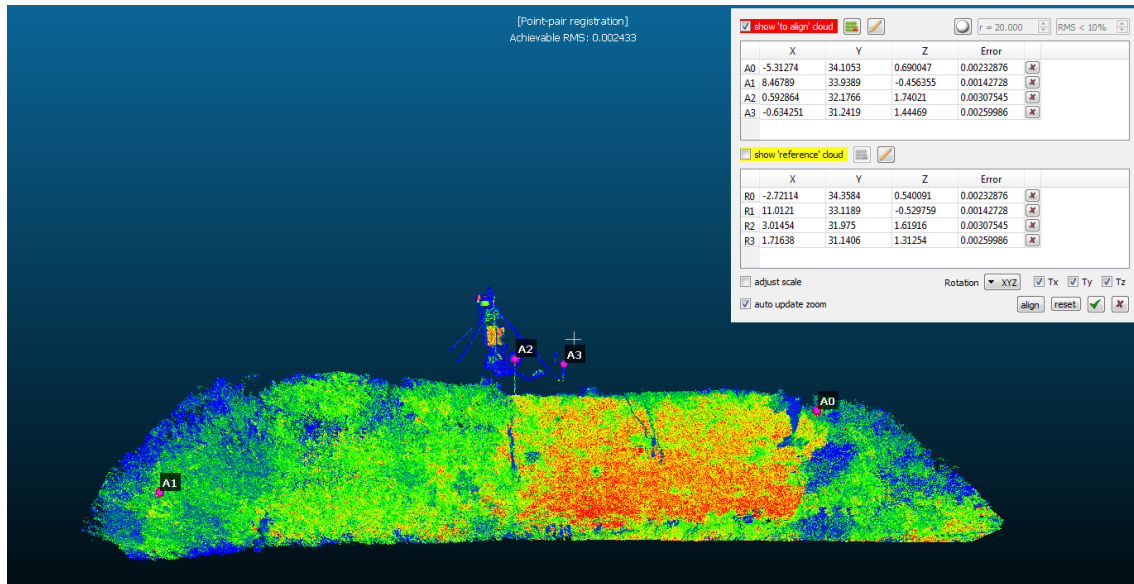
**ANNEX I: Matrius de transformació i error MQ**



## Matrius de transformació alineament manual

### Alineació T0-T1 (Cara nord)

#### Error MQ

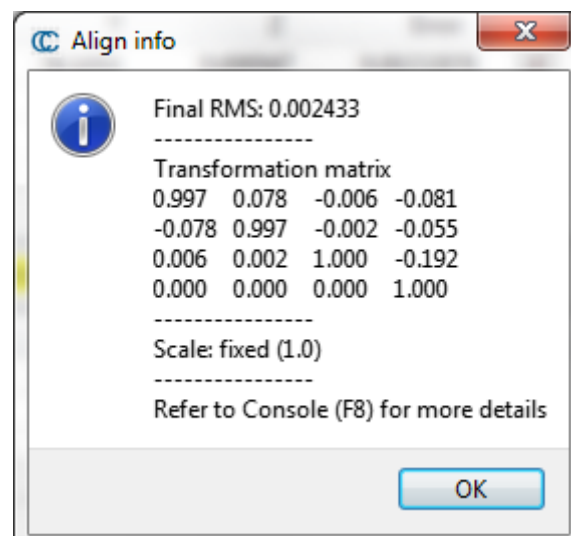


show 'to align' cloud				
	X	Y	Z	Error
A0	-5.31274	34.1053	0.690047	0.00232876
A1	8.46789	33.9389	-0.456355	0.00142728
A2	0.592864	32.1766	1.74021	0.00307545
A3	-0.634251	31.2419	1.44469	0.00259986

show 'reference' cloud				
	X	Y	Z	Error
R0	-2.72114	34.3584	0.540091	0.00232876
R1	11.0121	33.1189	-0.529759	0.00142728
R2	3.01454	31.975	1.61916	0.00307545
R3	1.71638	31.1406	1.31254	0.00259986

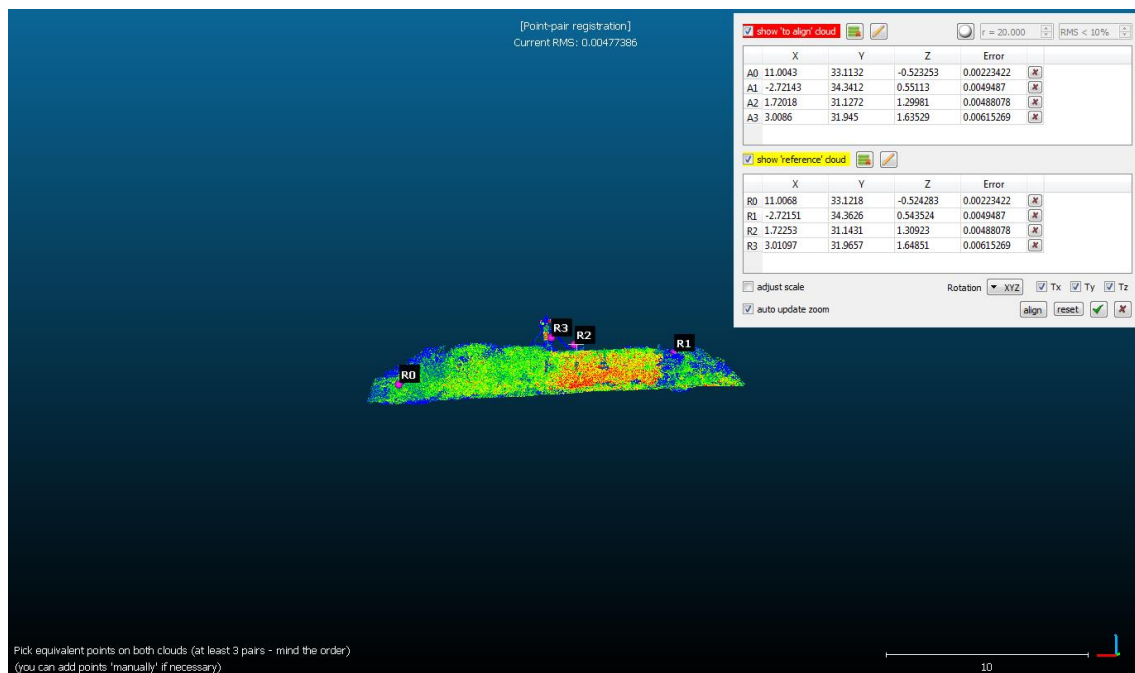
#### Matriu Transformacio





Alineació T1-T2 (cara nord)

## Error MQ



show 'to align' cloud

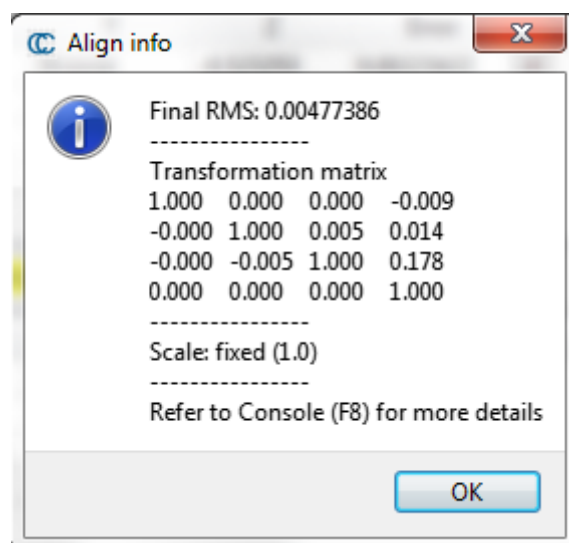
r = 20.000 RMS < 10%

	X	Y	Z	Error
A0	11.0043	33.1132	-0.523253	0.00223422
A1	-2.72143	34.3412	0.55113	0.0049487
A2	1.72018	31.1272	1.29981	0.00488078
A3	3.0086	31.945	1.63529	0.00615269

show 'reference' cloud

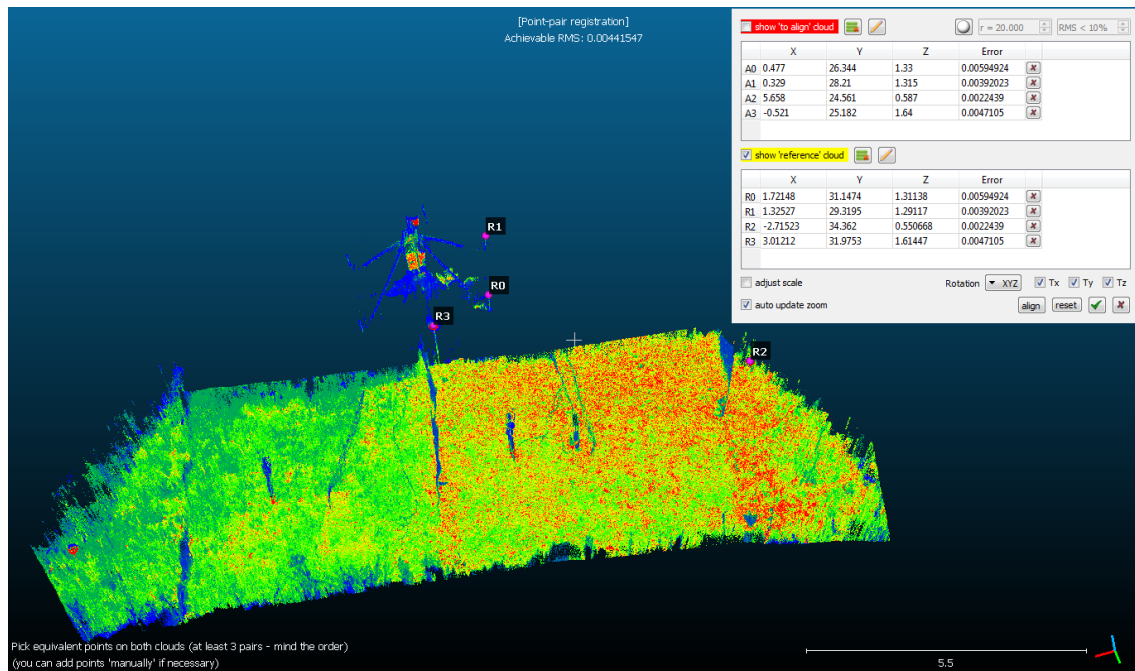
	X	Y	Z	Error
R0	11.0068	33.1218	-0.524283	0.00223422
R1	-2.72151	34.3626	0.543524	0.0049487
R2	1.72253	31.1431	1.30923	0.00488078
R3	3.01097	31.9657	1.64851	0.00615269

## Matriu transformació



Alineació T2-T3 (Costat Nord)

## Error MQ



show 'to align' cloud

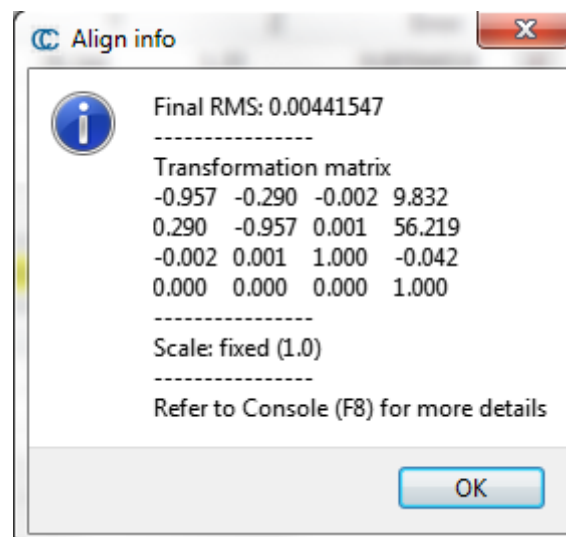
r = 20.000 RMS < 10%

	X	Y	Z	Error
A0	0.477	26.344	1.33	0.00594924
A1	0.329	28.21	1.315	0.00392023
A2	5.658	24.561	0.587	0.0022439
A3	-0.521	25.182	1.64	0.0047105

show 'reference' cloud

	X	Y	Z	Error
R0	1.72148	31.1474	1.31138	0.00594924
R1	1.32527	29.3195	1.29117	0.00392023
R2	-2.71523	34.362	0.550668	0.0022439
R3	3.01212	31.9753	1.61447	0.0047105

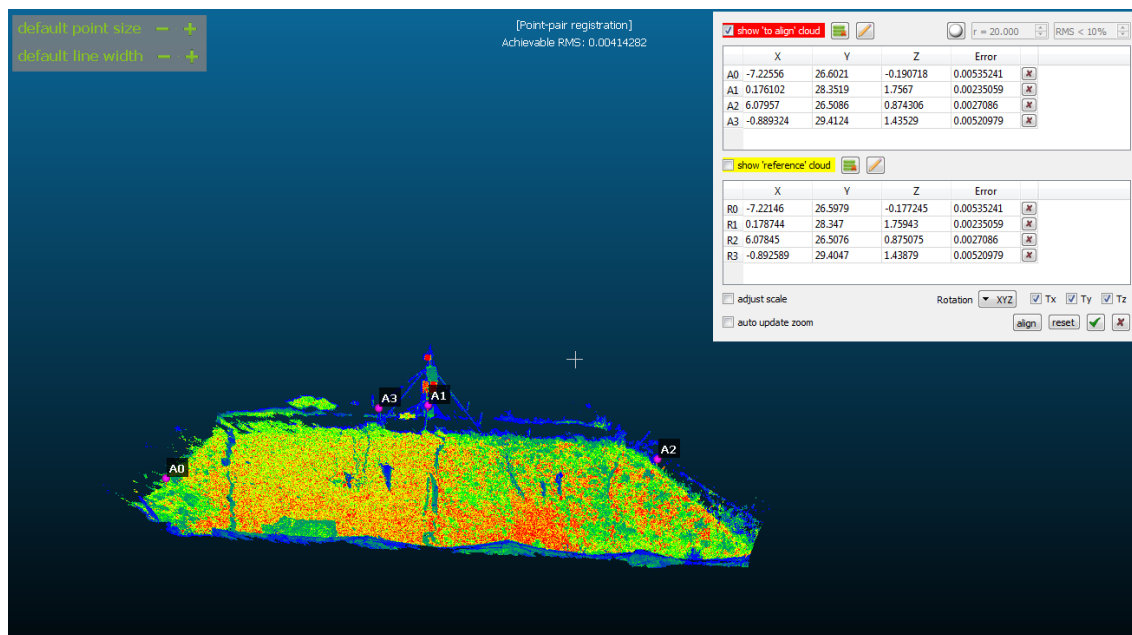
## Matriu Transformació





## Alineació T1-T2 (Costat Sud)

### Error MQ



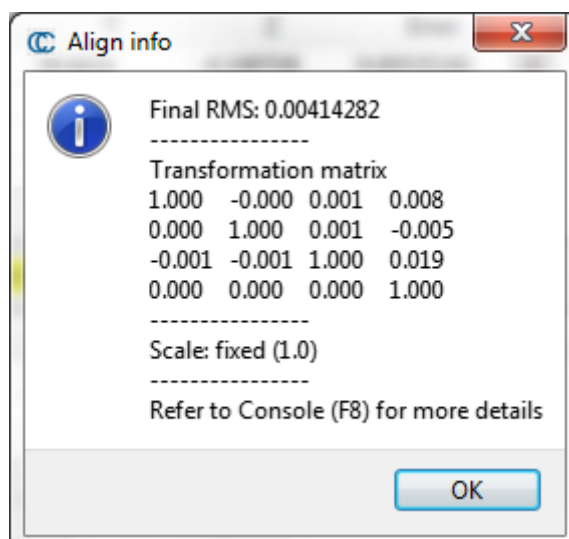
	X	Y	Z	Error
A0	-7.22556	26.6021	-0.190718	0.00535241
A1	0.176102	28.3519	1.7567	0.00235059
A2	6.07957	26.5086	0.874306	0.0027086
A3	-0.889324	29.4124	1.43529	0.00520979

	X	Y	Z	Error
R0	-7.22146	26.5979	-0.177245	0.00535241
R1	0.178744	28.347	1.75943	0.00235059
R2	6.07845	26.5076	0.875075	0.0027086
R3	-0.892589	29.4047	1.43879	0.00520979

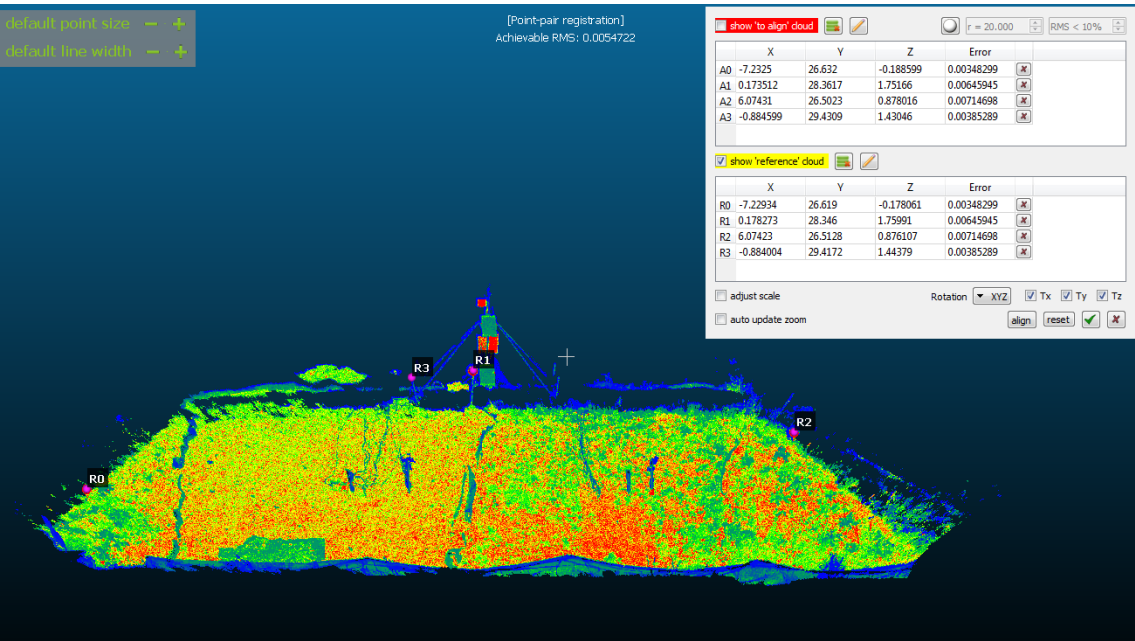
adjust scale ☐ auto update zoom ☐ Rotation: XYZ ☒ Tx ☒ Ty ☒ Tz  
align reset OK X

### Matriu Transformació



Alineació T2-T3 (Costat Sud)

Error MQ



show 'to align' cloud

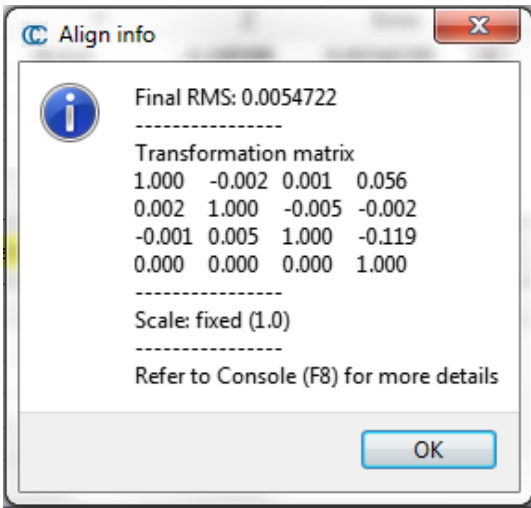
	X	Y	Z	Error
A0	-7.2325	26.632	-0.188599	0.00348299
A1	0.173512	28.3617	1.75166	0.00645945
A2	6.07431	26.5023	0.878016	0.00714698
A3	-0.884599	29.4309	1.43046	0.00385289

show 'reference' cloud

	X	Y	Z	Error
R0	-7.22934	26.619	-0.178061	0.00348299
R1	0.178273	28.346	1.75991	0.00645945
R2	6.07423	26.5128	0.876107	0.00714698
R3	-0.884004	29.4172	1.44379	0.00385289

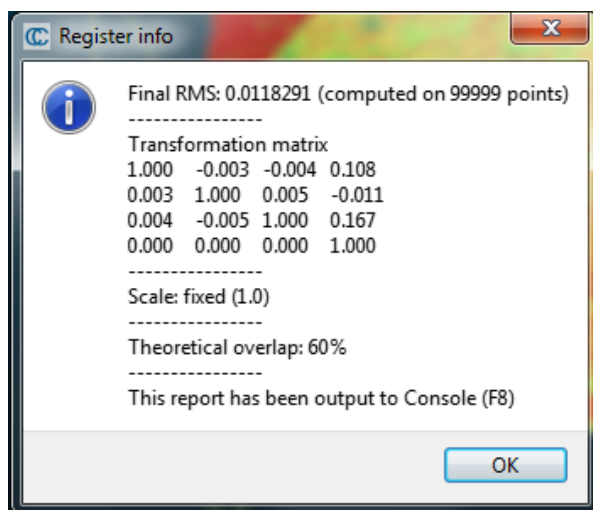
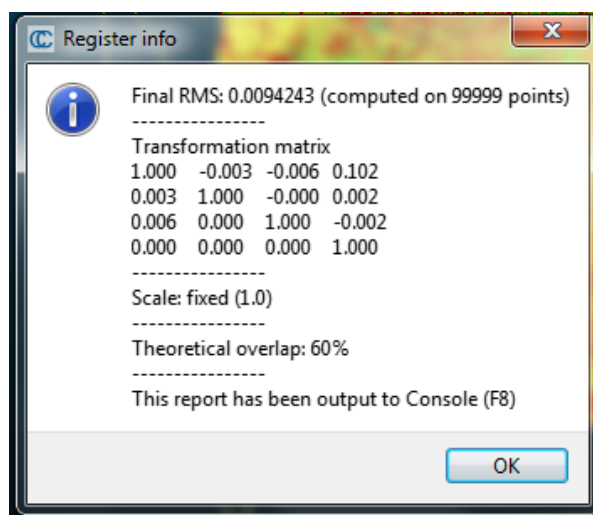
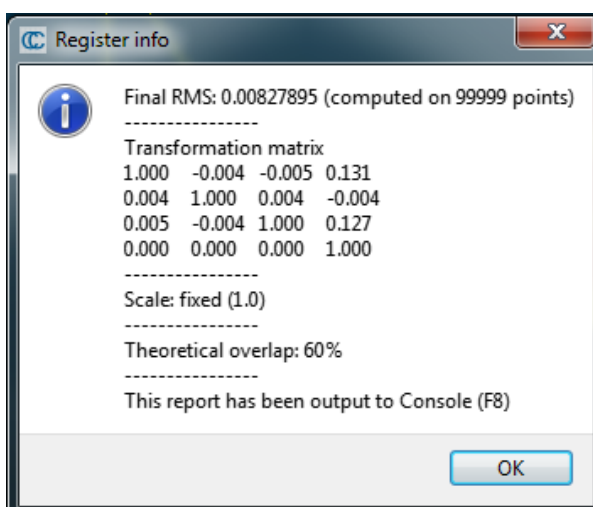
adjust scale ☐ auto update zoom ☐ Rotation: XYZ Tx Ty Tz align reset

Matriu Transformació

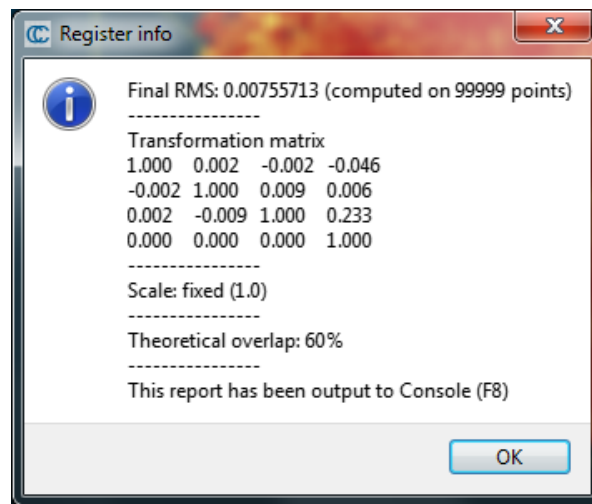
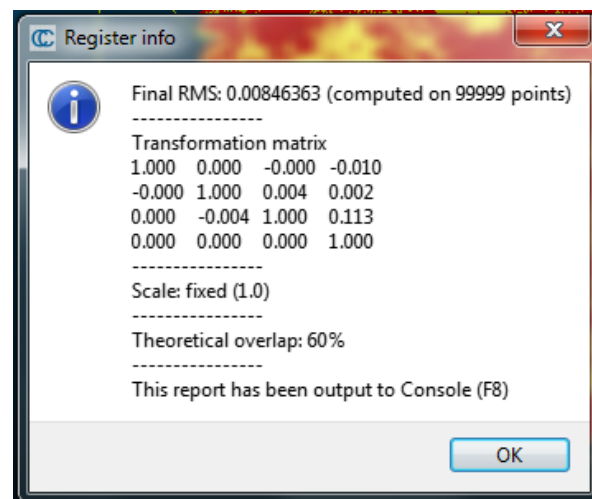
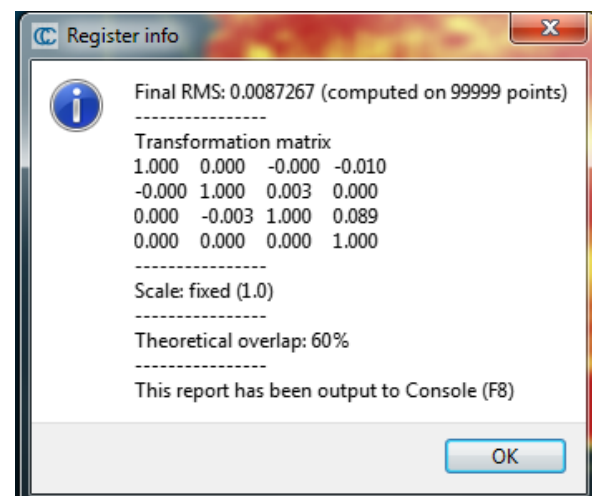


**Matrius transformació ICP**



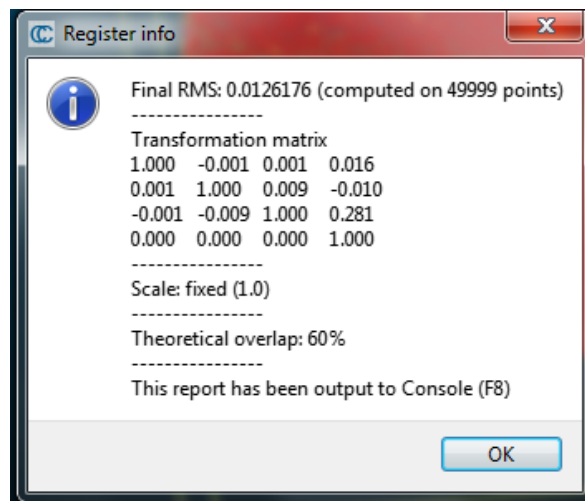
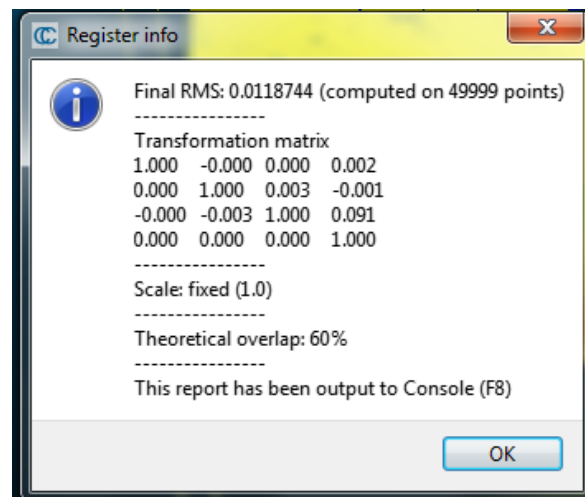
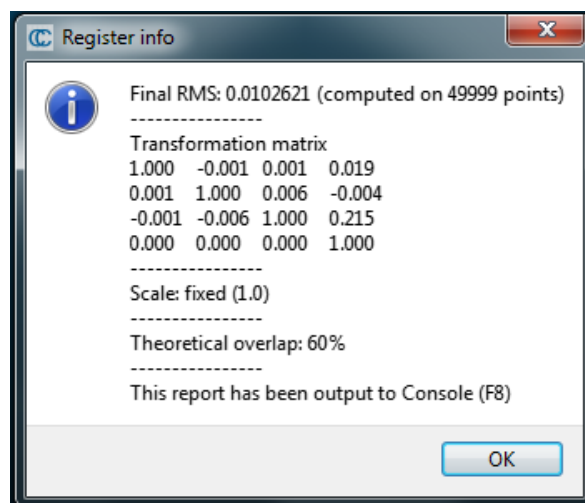
**T0-T1 Cara Nord (Sense vegetació)****T1-T2 Cara Nord (Sense vegetació)****T2-T3 Cara Nord (Sense vegetació)**

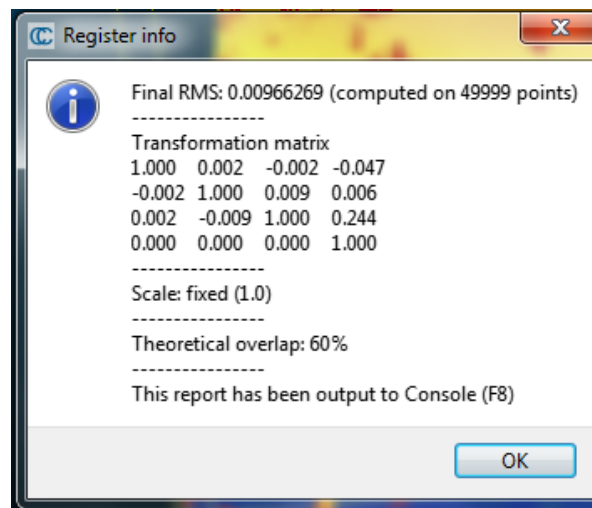
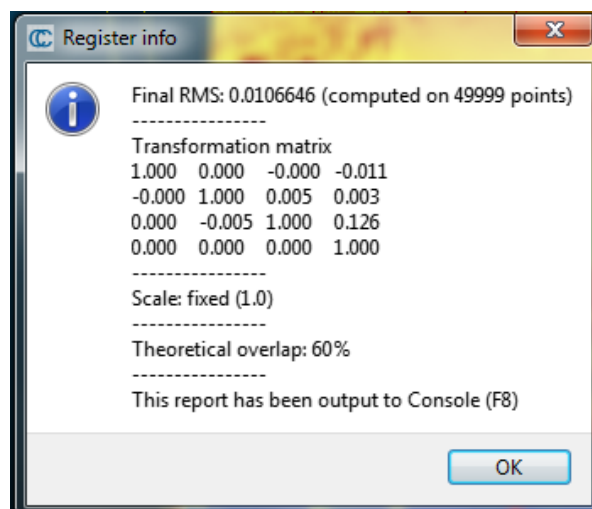
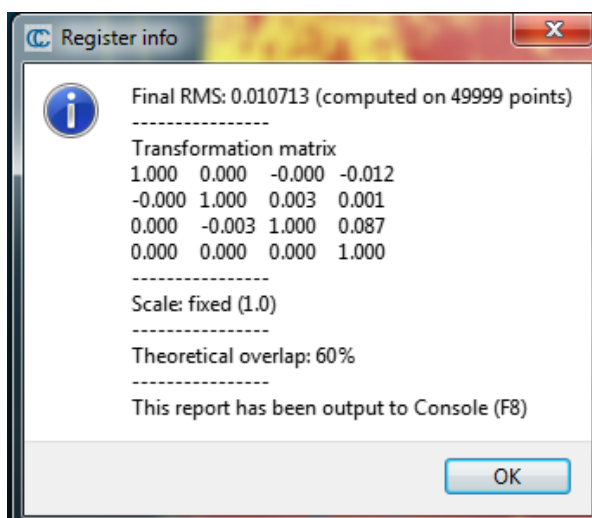


**T0-T1 Cara Sud (Sense Vegetació)****T1-T2 Cara Sud (Sense vegetació)****T2-T3 Cara Sud (Sense vegetació)**

**Matrius transformació ICP superfícies**

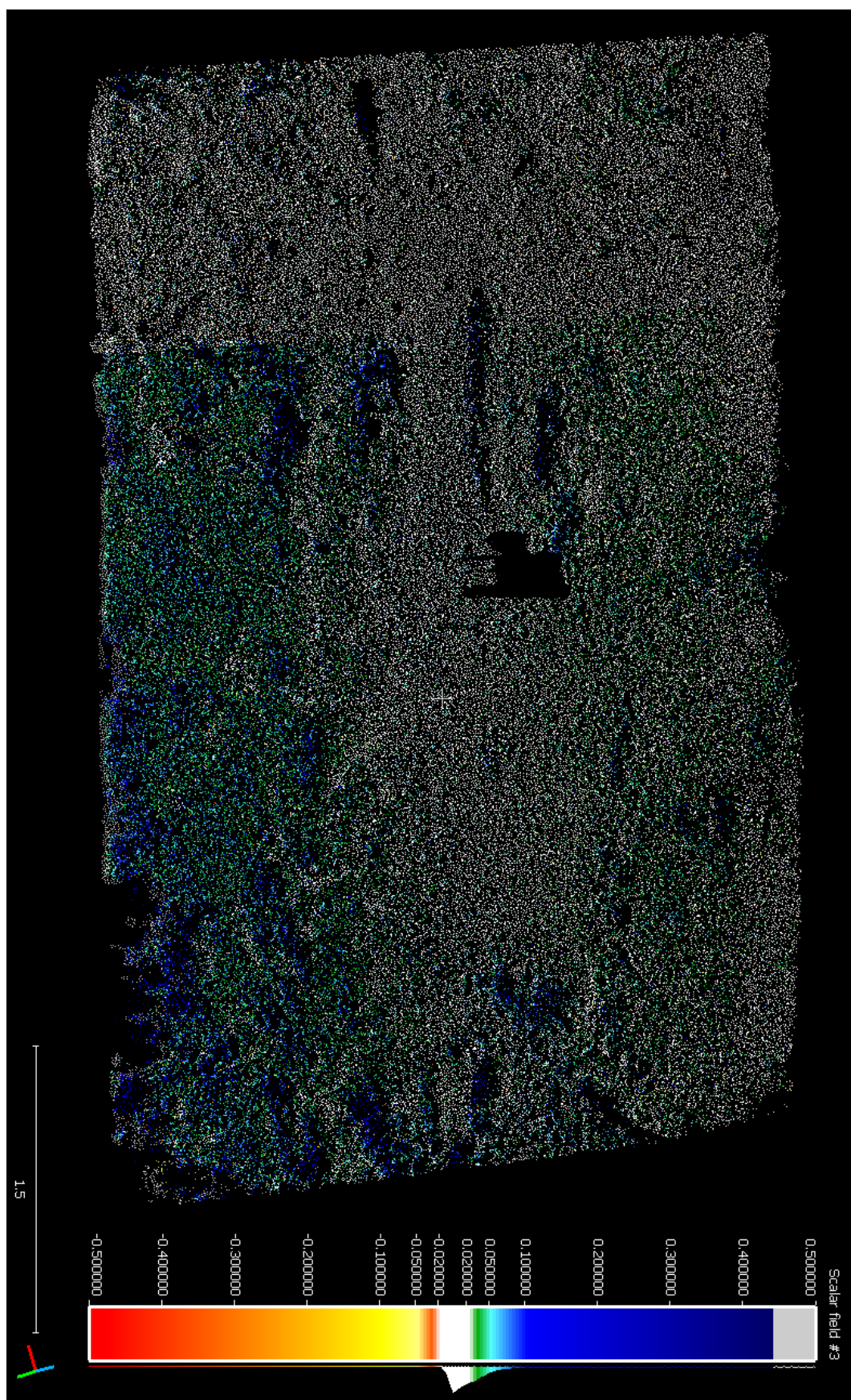


**Cara Nord T0-T1 (Sense vegetació)****Cara Nord T1-T2 (Sense vegetació)****Cara Nord T2-T3 (Sense vegetació)**

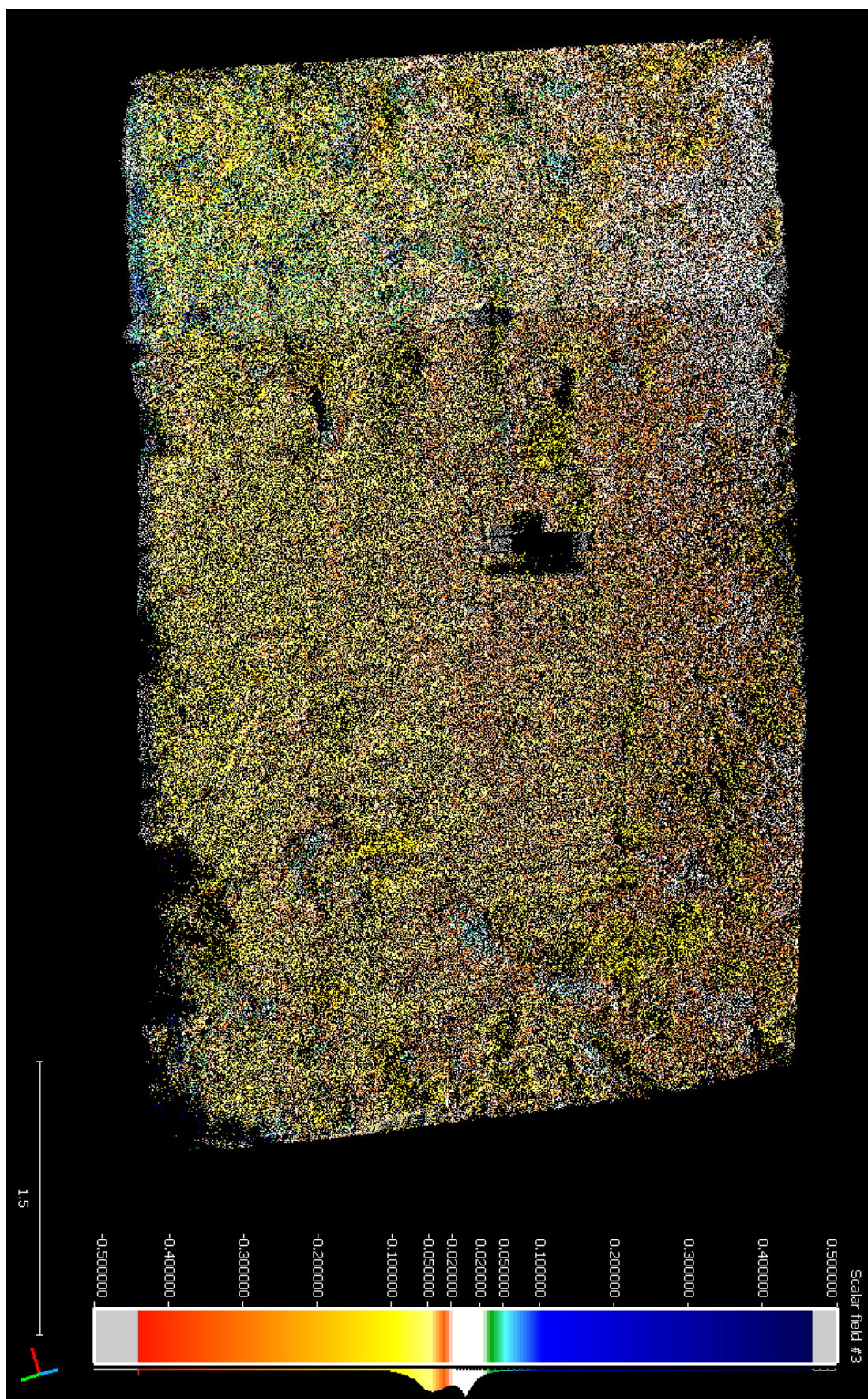
**Costat Sud T0-T1 (Sense vegetació)****Costat Sud T1-T2 (Sense vegetació)****Costat Sud T2-T3 (Sense vegetació)**

**ANNEX II: Càlcul distancies**

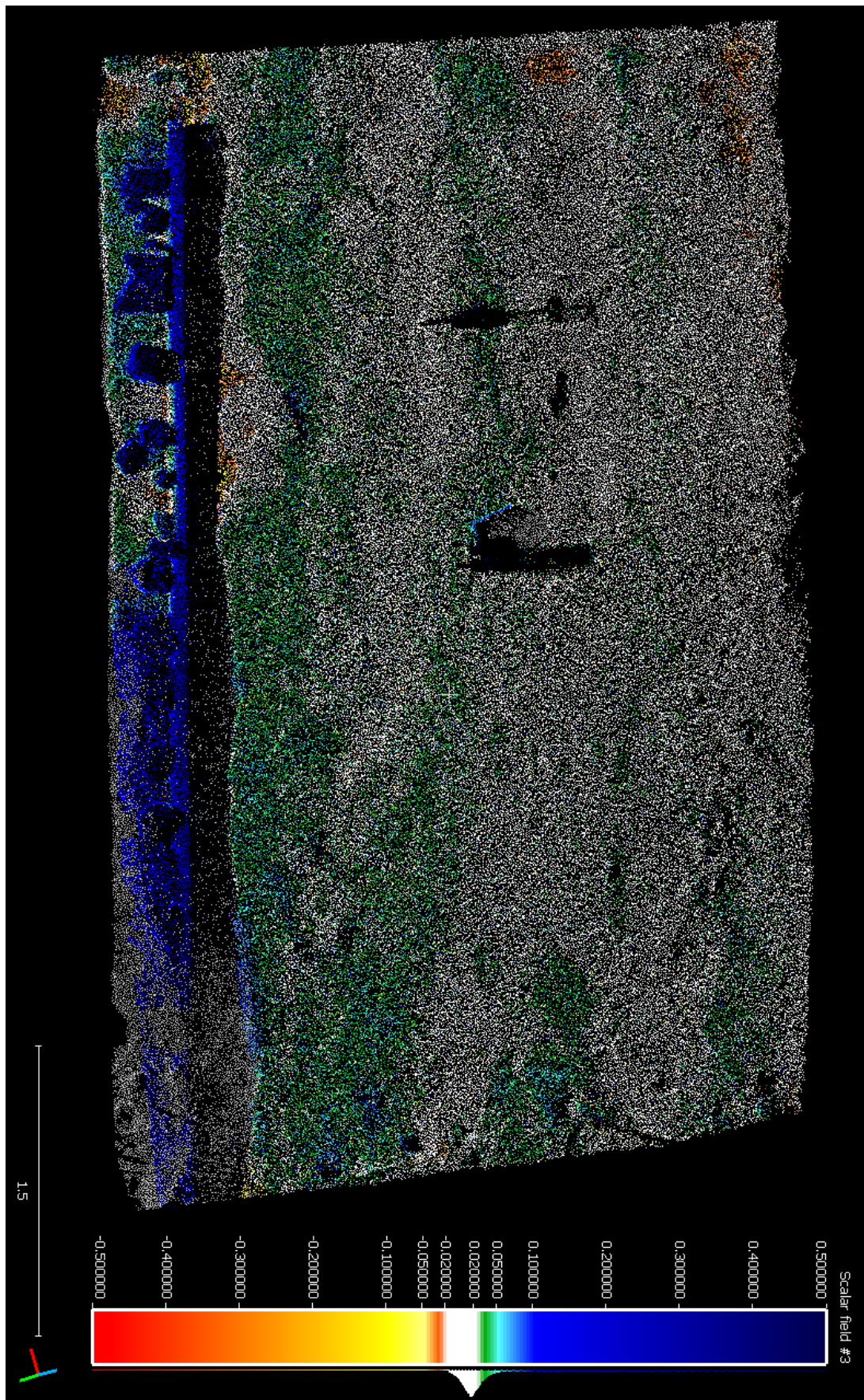


**Costat Nord**T0-T1 Costat Nord

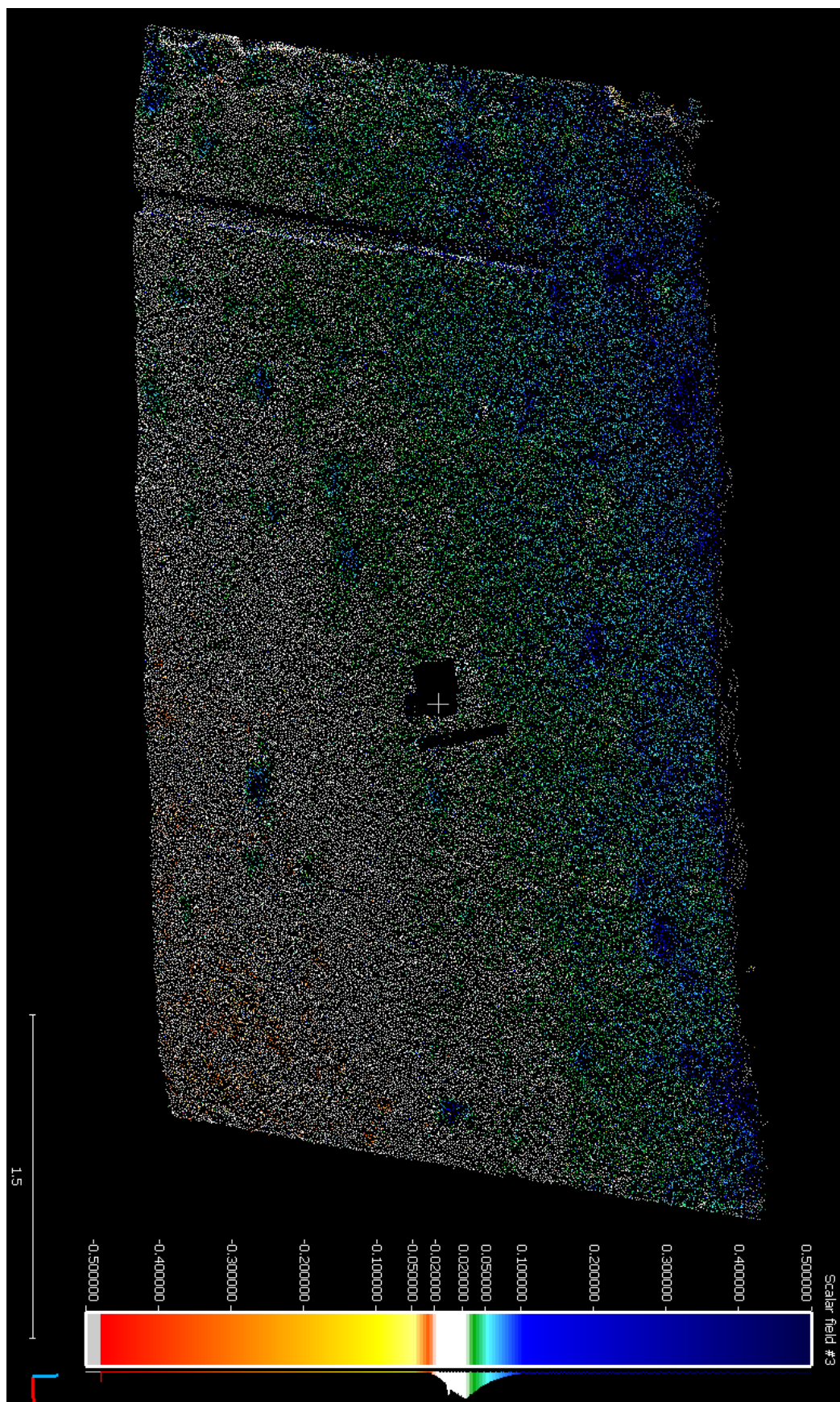


T1-T2 Costat Nord

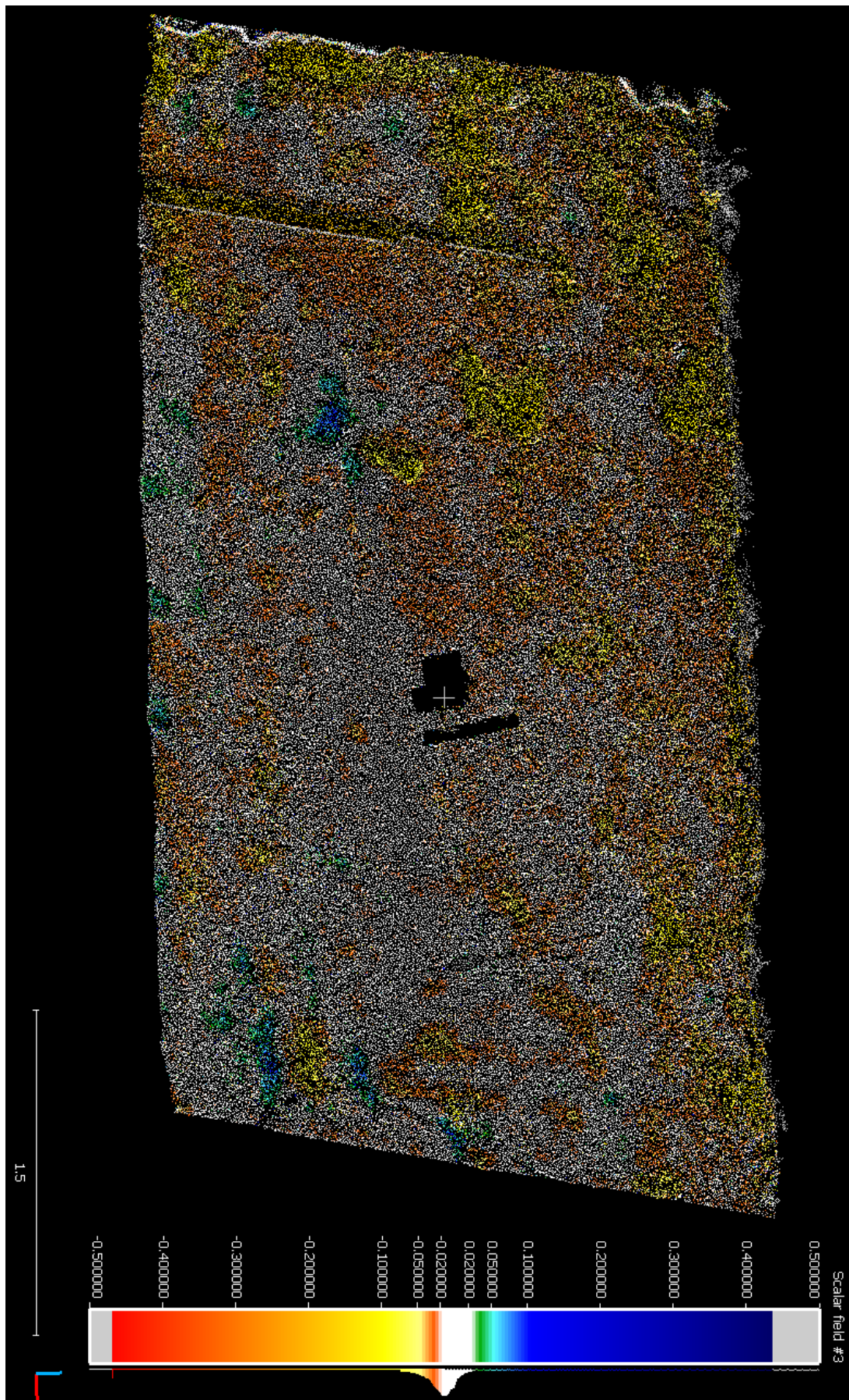


T2-T3 Costat Nord

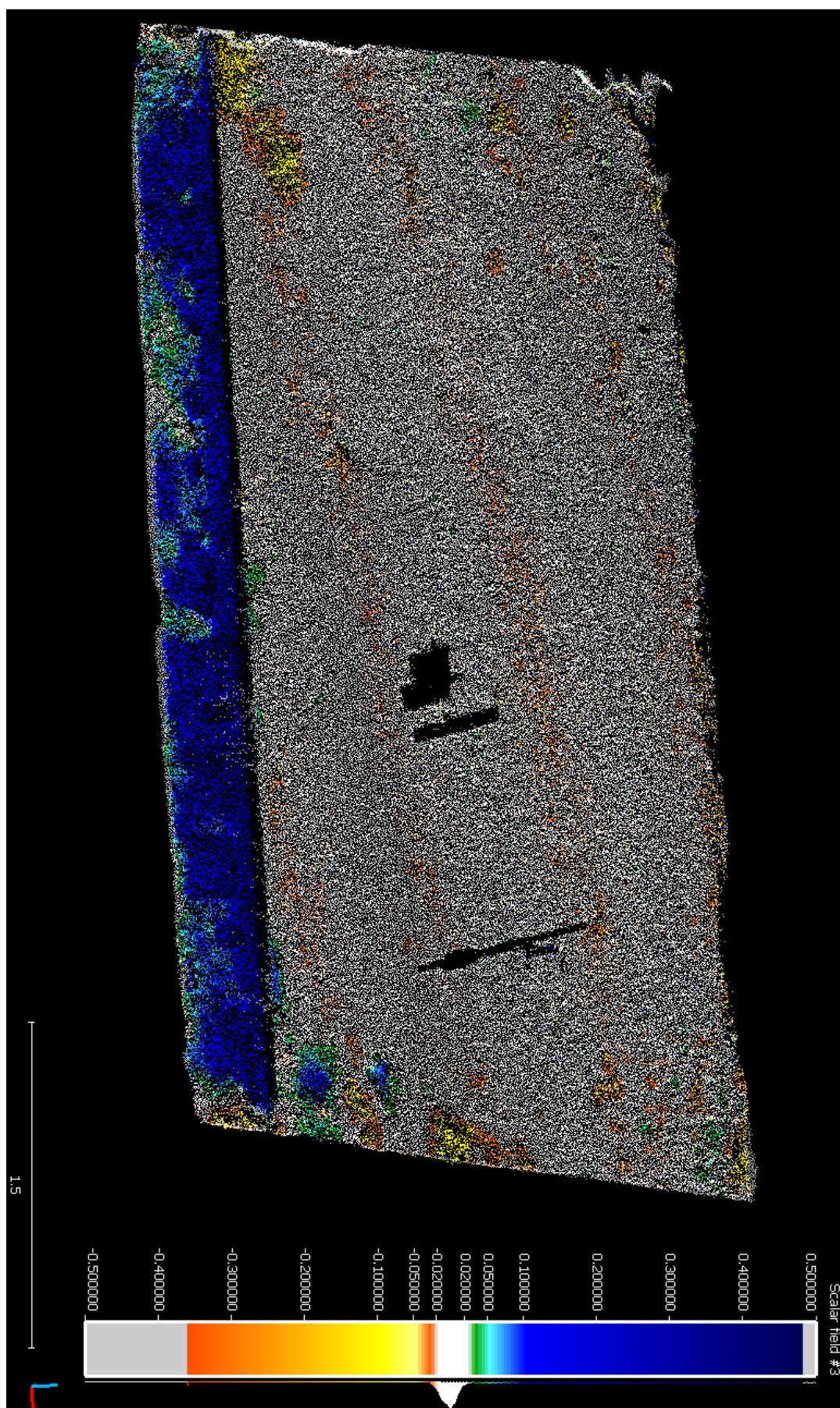


**Costat Sud****T0-T1 Costat Sud**



T1-T2 Costat Sud

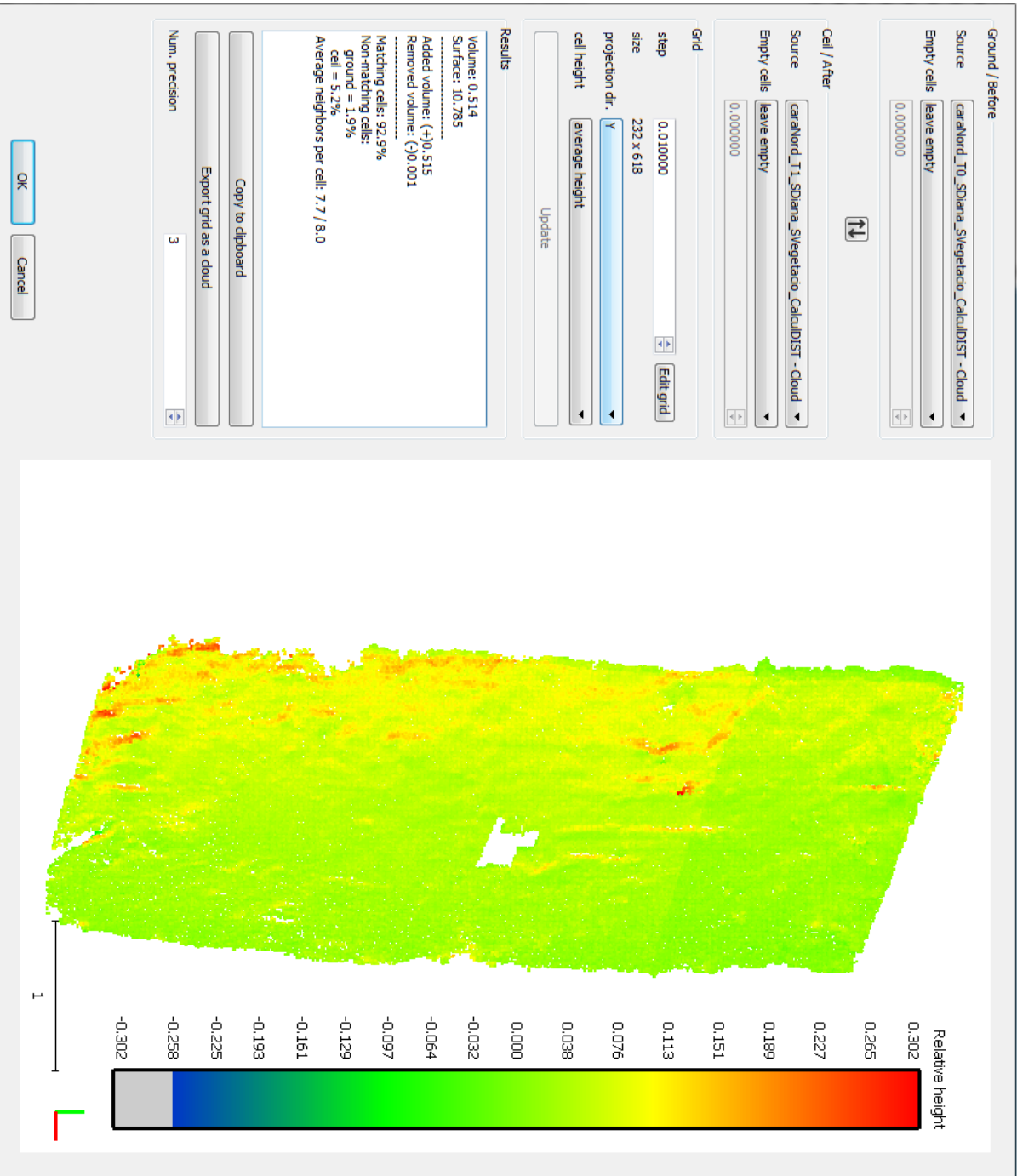


T2-T3 Costat Sud

**ANNEX III: Càlcul Volum**

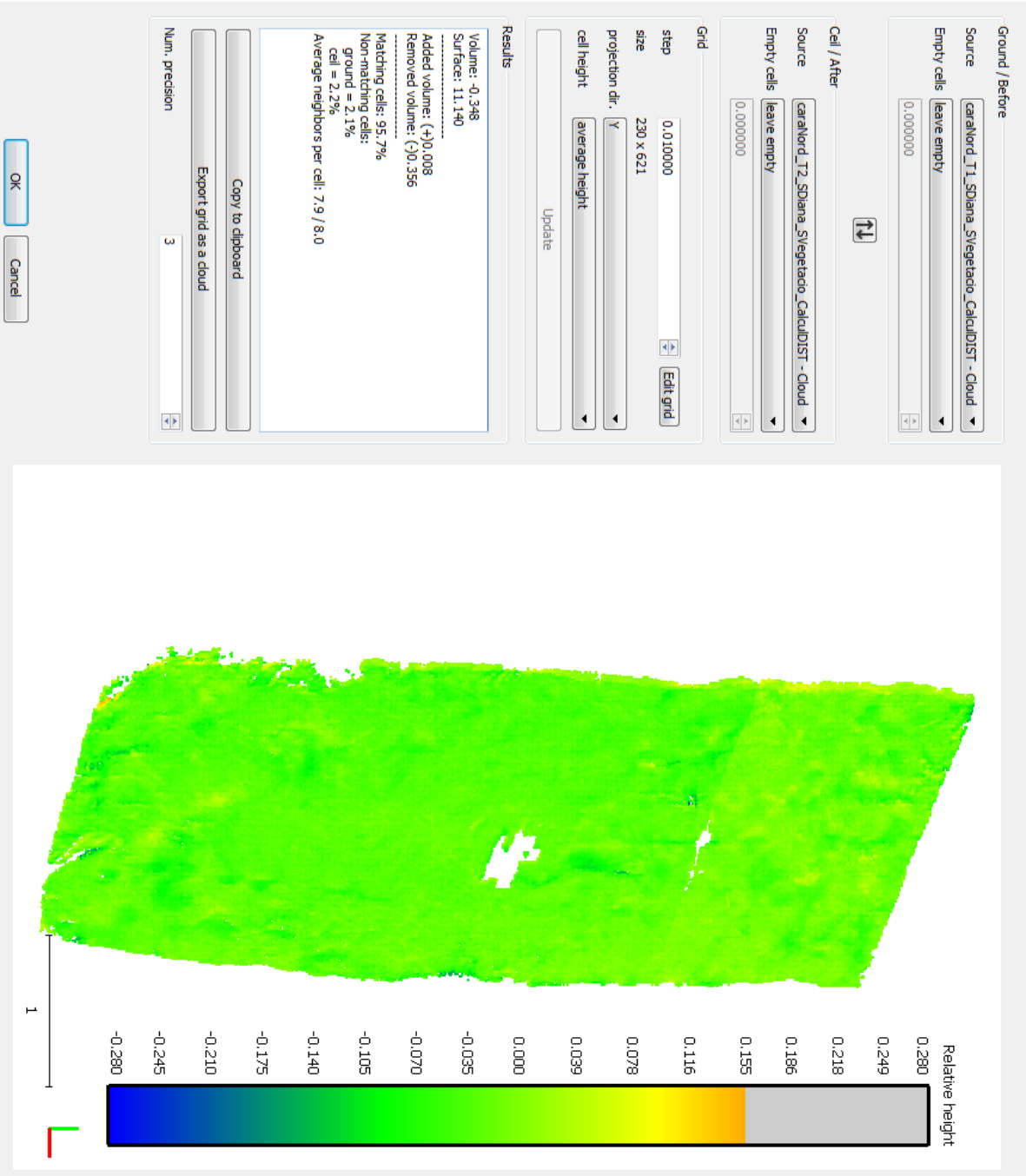


Calcul Volum T0-T1 Costat Nord

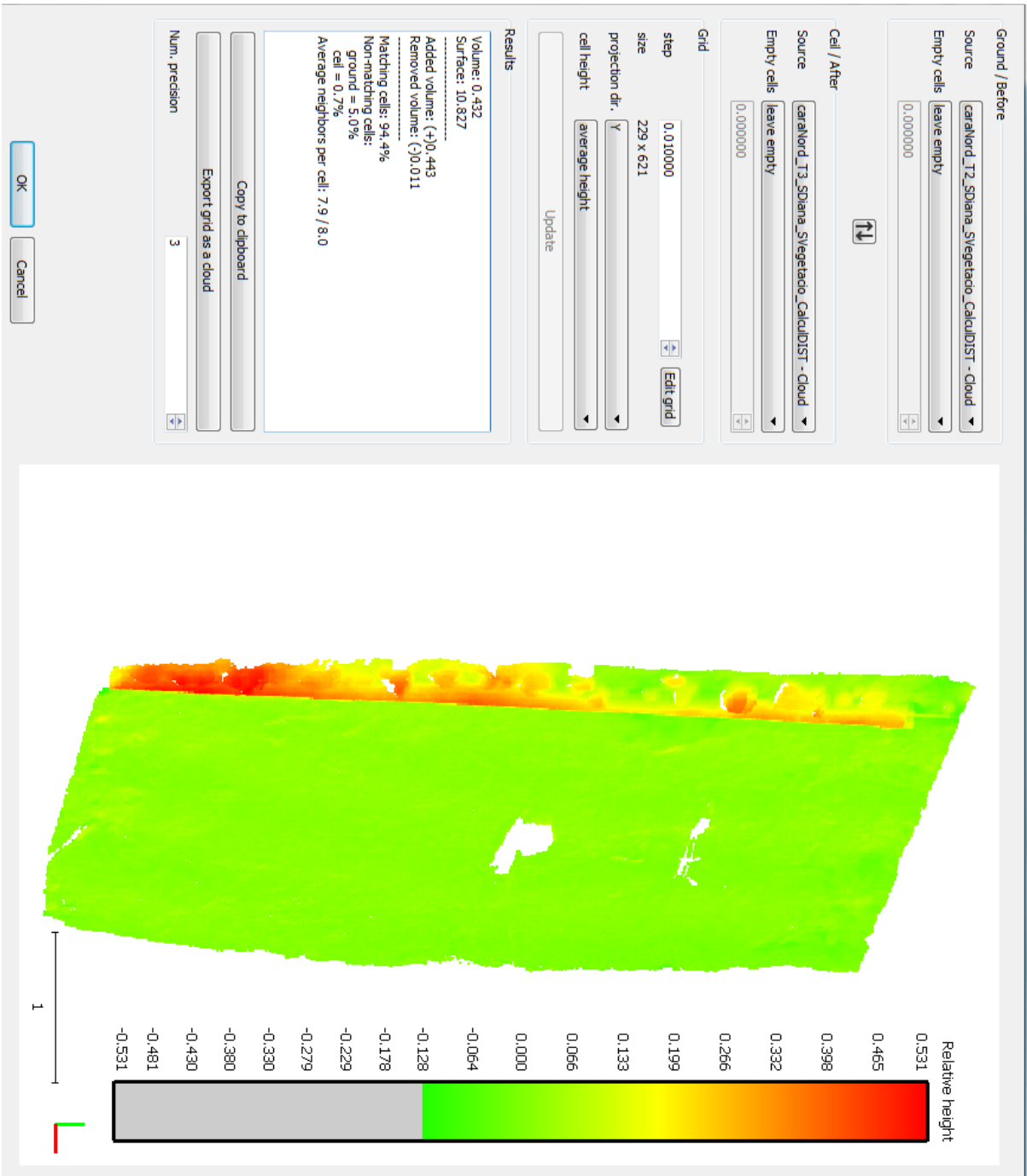




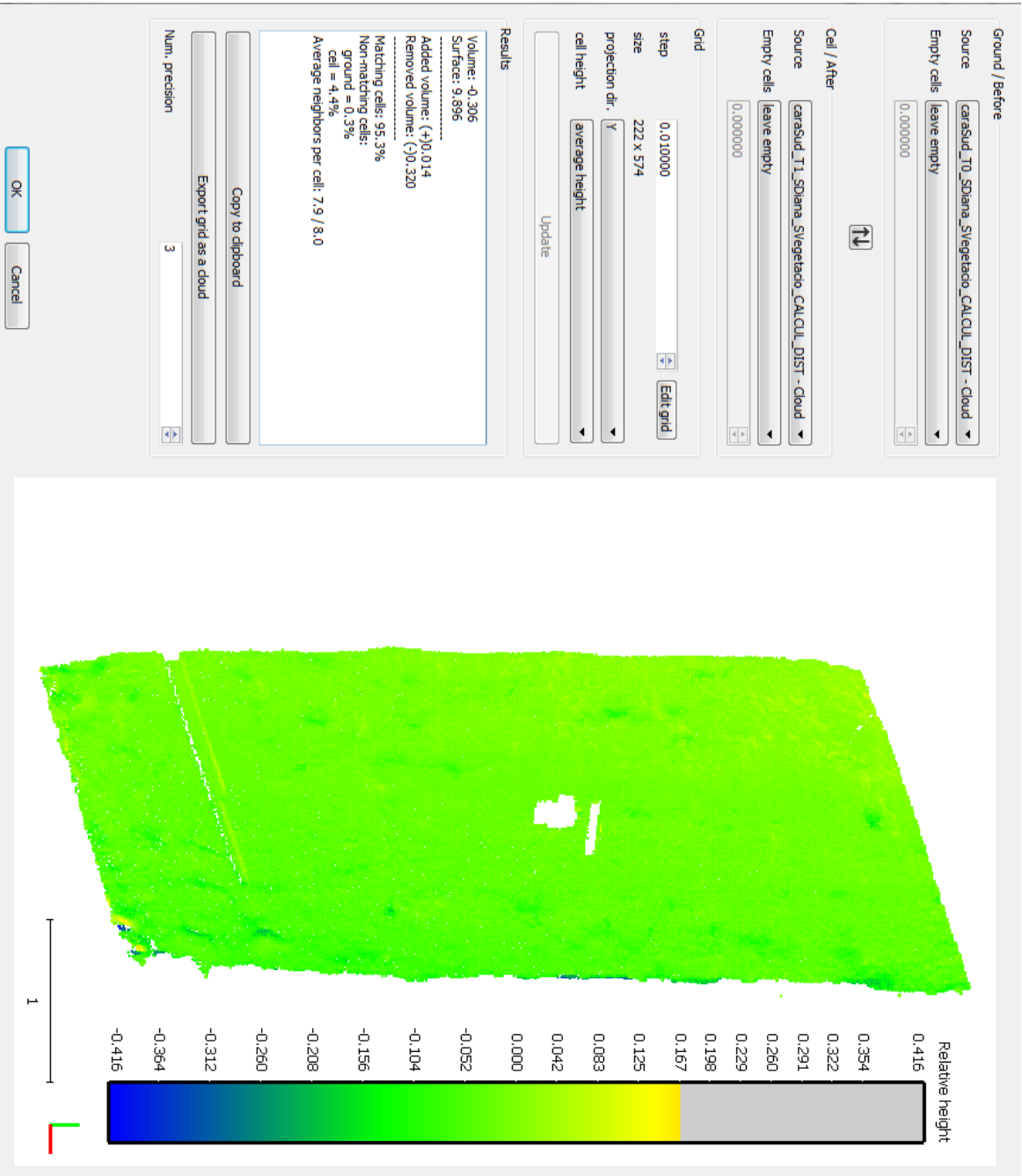
Calcul Volum T1-T2 Costat Nord



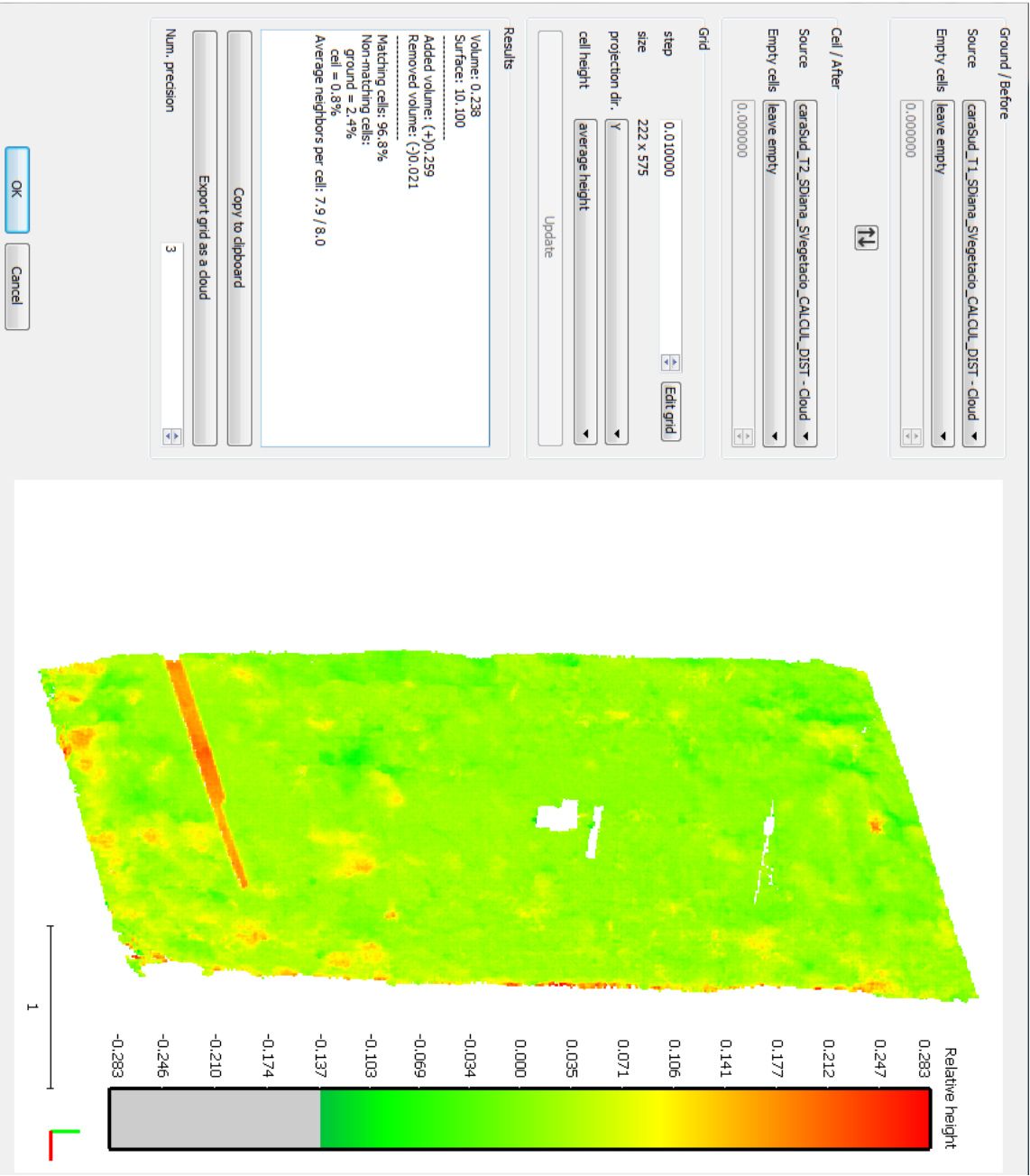
Calcul Volum T2-T3 Costat Nord



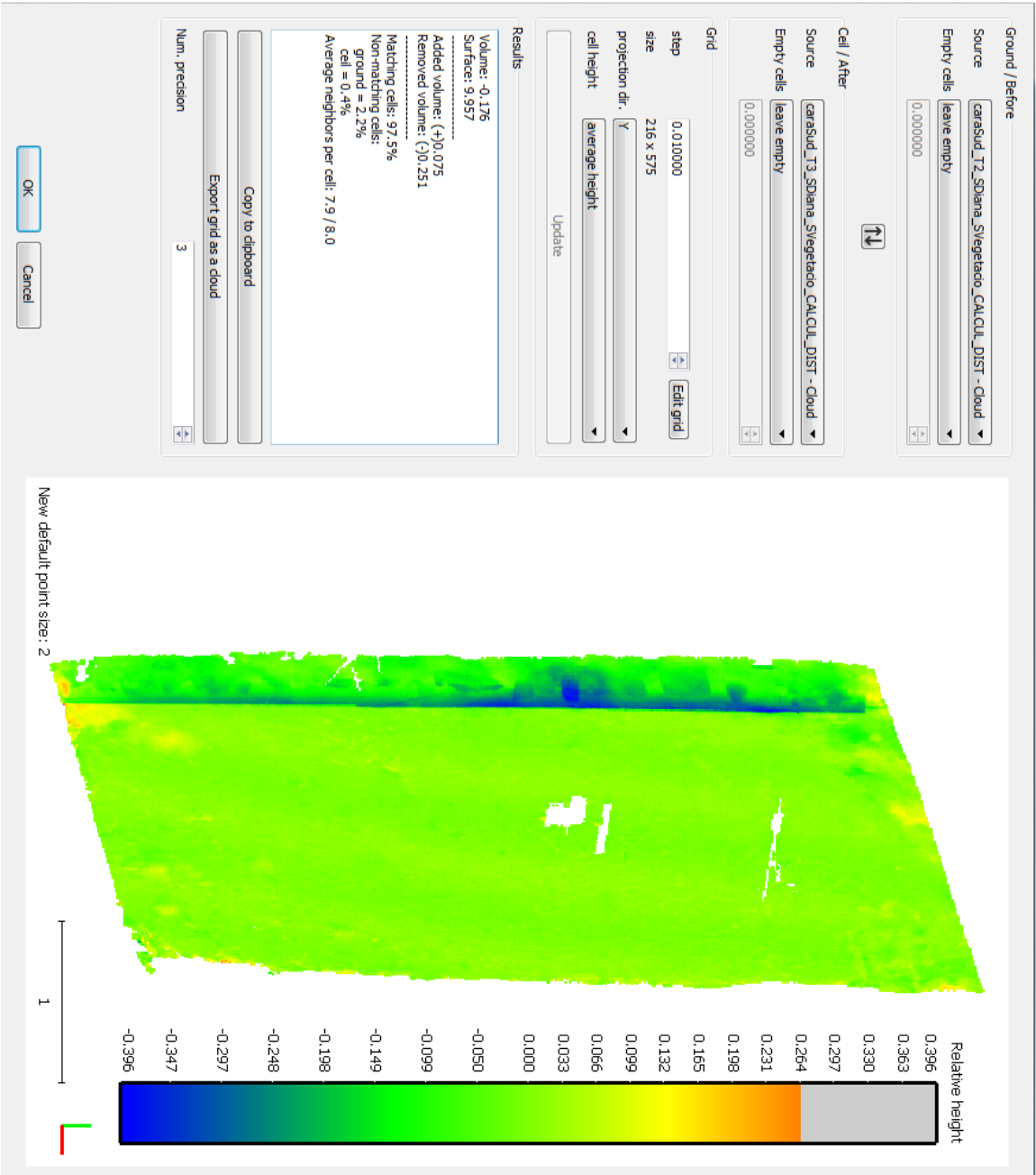
Calcul Volum T0-T1 Costat Sud



Calcul Volum T1-T2 Costat Sud



Calcul Volum T2-T3 Costat Sud

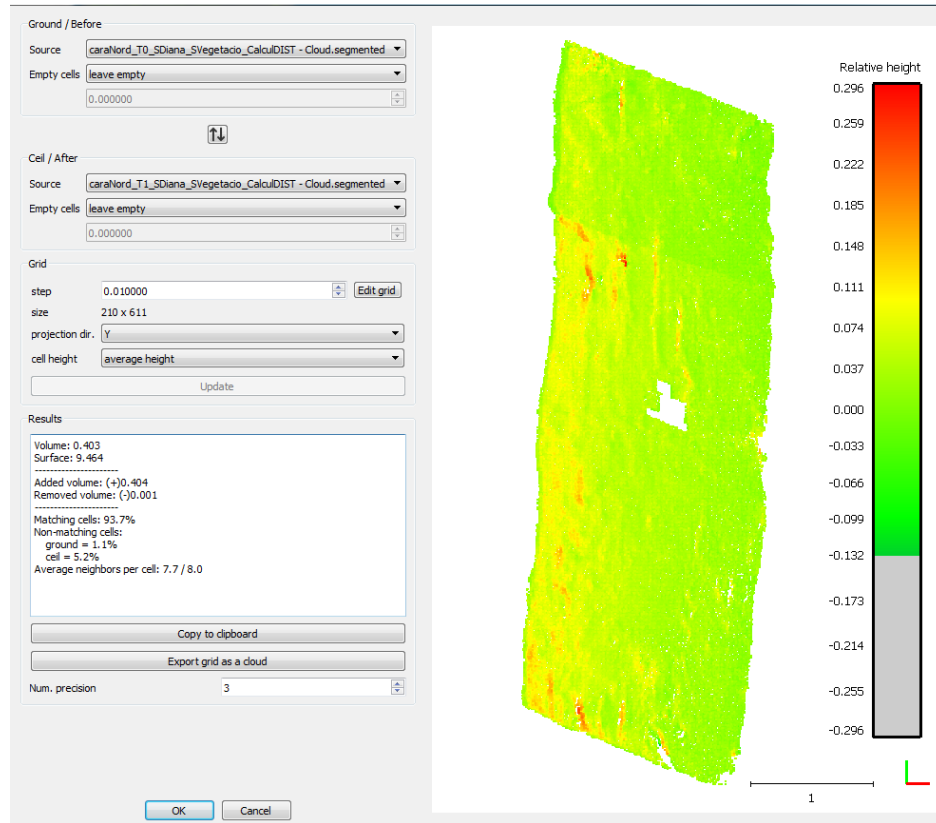


**Càlcul de volum sense cuneta**

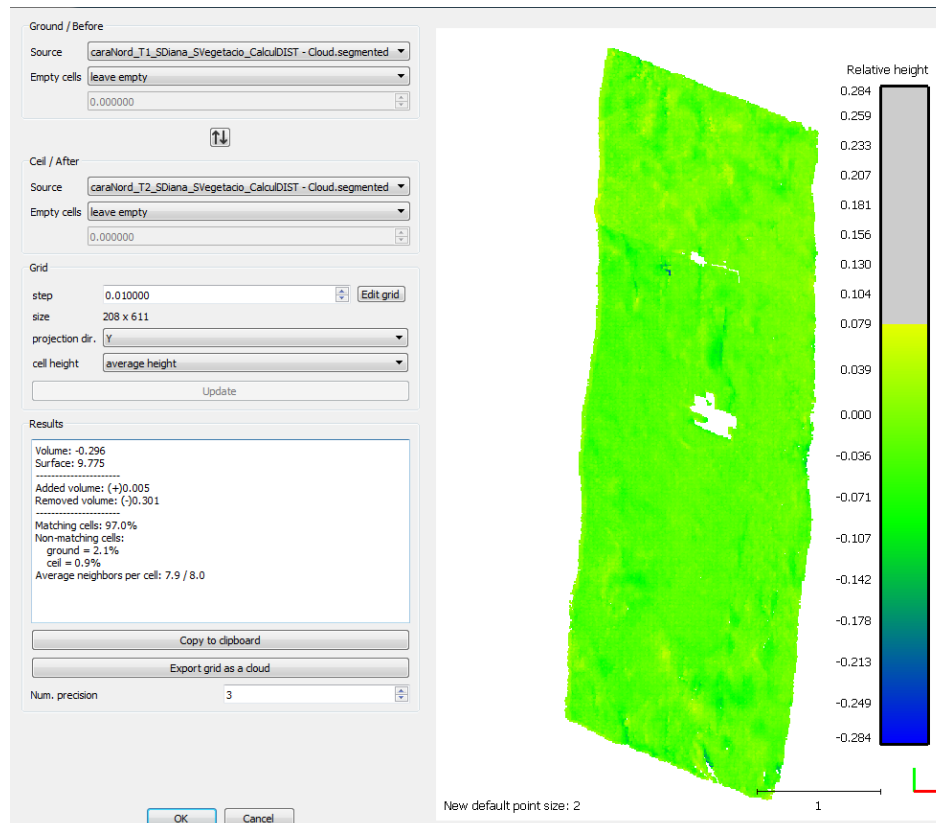


## Costat Nord

### T0-T1

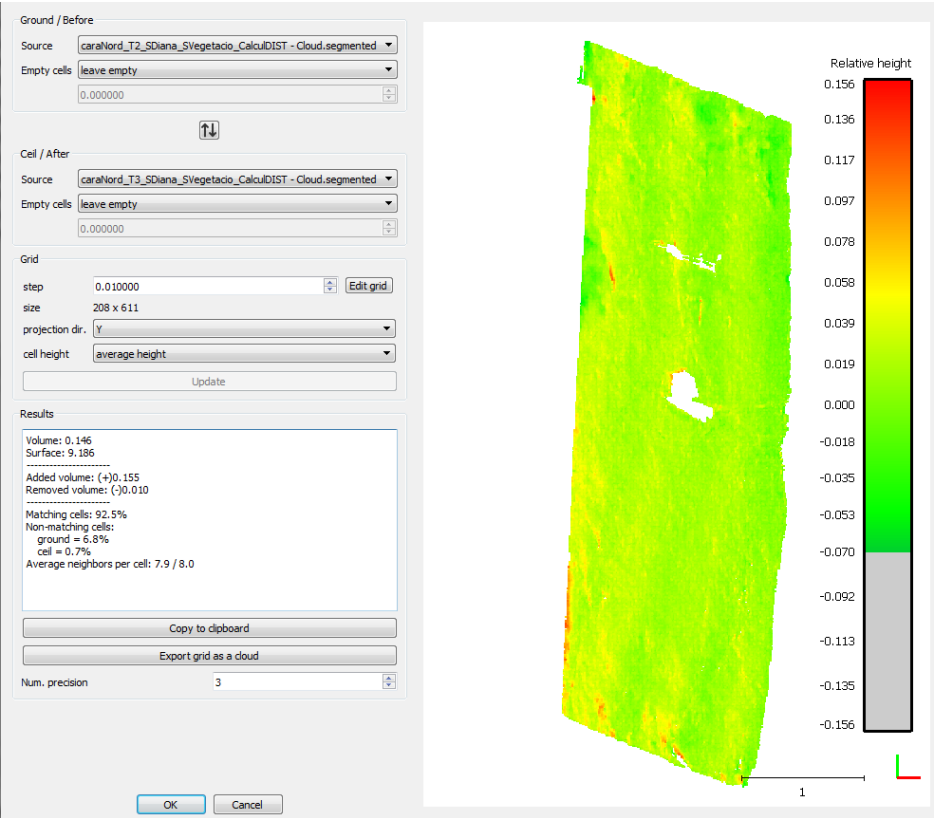


### T1-T2



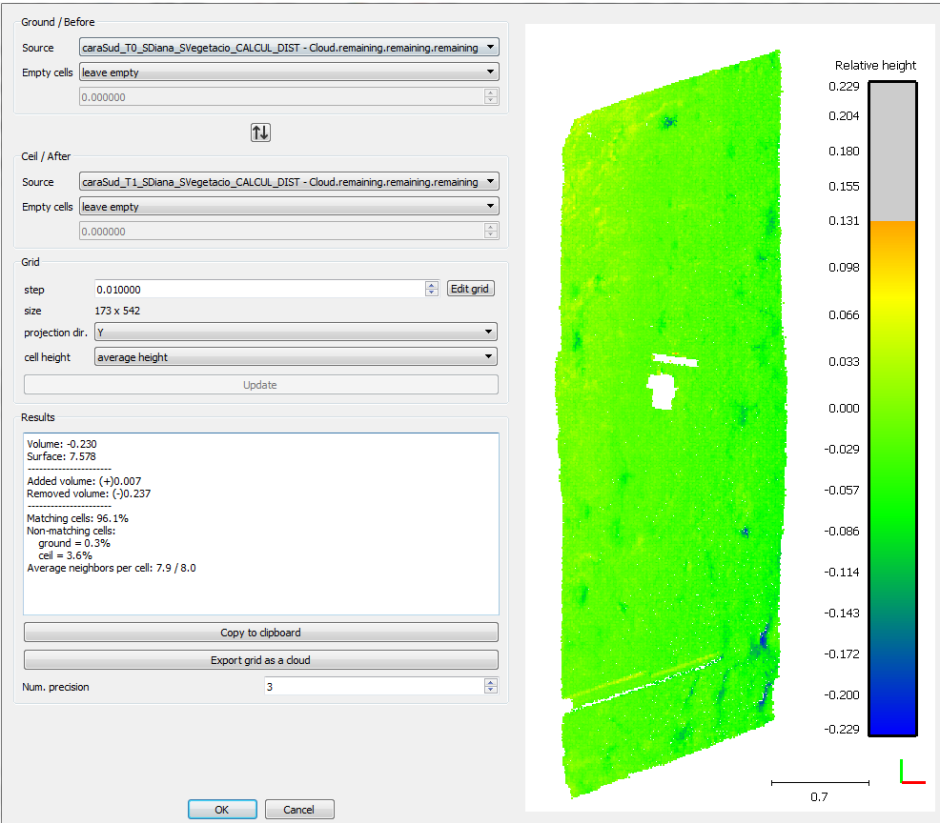


T2-T3

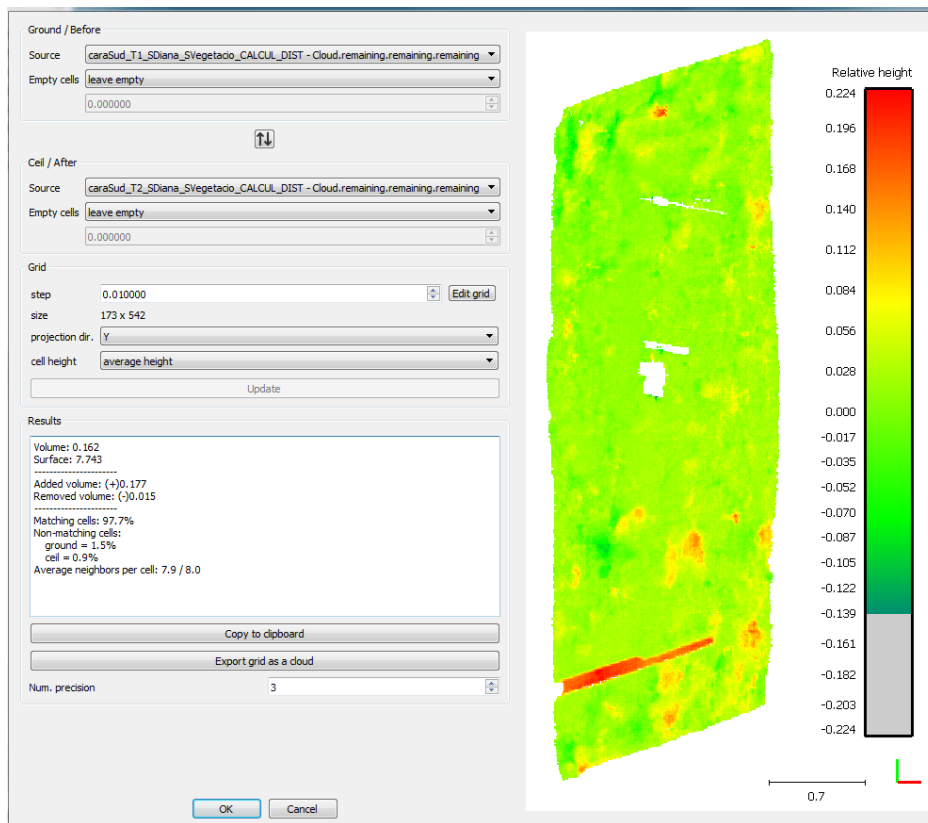


Costat Sud

T0-T1



## T1-T2



## T2-T3

